

# UNIVERSIDAD DE CUENCA



## FACULTAD DE INGENIERÍA

### ESCUELA DE INGENIERÍA ELÉCTRICA

#### MODELADO DE ESTACIONES DE CARGA RÁPIDA PARA VEHÍCULOS ELÉCTRICOS Y SUS EFECTOS EN UN SISTEMA DE DISTRIBUCIÓN DE ENERGÍA ELÉCTRICA

*Trabajo de titulación previo a la obtención del título de Ingeniero Eléctrico*

Autor:

Santiago Eduardo Siavichay Morocho

Ci: 0104690813

Director:

Luis Gerardo González Morales PhD.

Ci: 1729711059

CUENCA-ECUADOR

2017



# Resumen

Este documento presenta una revisión de los distintos tipos de cargadores de vehículos eléctricos según la clasificación de la norma SAEJ 1772 y según la norma IEC 61821-1, que permite conocer las características principales de los cargadores para luego hacer un enfoque más amplio hacia las estaciones de carga rápida.

En el capítulo 2 de este trabajo, se estudió el diseño e implementación de cuatro topologías de estaciones de carga rápida resultantes de la combinación de dos topologías de rectificadores controlados (VSI y VIENNA) con dos topologías de convertidores DC/DC aislados (Medio Puente y Puente Completo) para luego compararlos y determinar el mejor modelo de estación de carga rápida que permitirá realizar futuros análisis. Con el fin de conocer el comportamiento de la estación de carga rápida durante todo el proceso de carga de un vehículo eléctrico, este capítulo incluye el modelamiento e implementación de una batería estándar de vehículo eléctrico con tecnología de polímero de litio. El control de carga de la batería se realiza mediante control de corriente constante y por control de voltaje constante.

A partir del modelo funcional de estación de carga de rápida, en el capítulo 3 se analiza la implementación de estaciones de carga rápida dentro de un alimentador del sistema de distribución eléctrica de la ciudad de Cuenca. Para realizar este análisis se parte de criterios internacionalmente aceptados que permiten establecer el lugar adecuado para la implementación de estaciones de carga rápida. Con el lugar de implementación de las estaciones de carga rápida definido, se analizan las características operativas del alimentador correspondiente antes y después de implementar las estaciones, permitiendo estimar el impacto que éstas tendrán en los niveles de voltaje, flujos de carga, cargabilidad de los alimentadores y armónicos de tensión y corriente.

A partir del estudio realizado en este documento, se determina el posible impacto que tendrá la implementación de las estaciones de carga rápida en la ciudad de Cuenca, y permite establecer una metodología para estudiar otras zonas factibles para la implementación de dichas estaciones.

## Palabras Clave

Vehículo Eléctrico, Electrolinera, Estación de Carga Rápida, Electrónica de Potencia, Topologías de Convertidores, Convertidores AC/DC, Convertidores DC/DC, Modelos de Batería, Control de Carga.



# Abstract

This document presents a review of the different topologies of chargers based on the standards SAEJ 1772 and IEC 61821-1. We will start describing the main features of fast charge stations. Then, models are applied and verified with simulations of the chargers in the power distribution network.

In the second chapter, the design and implementation of four fast charger topologies are shown. These topologies are a combination of two topologies of rectifiers (VSI and VIENNA) whit two topologies of DC/DC isolated converters (Full Bridge and Half Bridge). A comparative analysis is presented in order to determinate the best one of them.

After the best fast charger topology is found, the third chapter describes the implementation of the four fast charge stations in a feeder of the electric distribution network in Cuenca city. Using international recommendation, the best place to implement those fast charge stations is shown. Then, the analysis of load flow, harmonics, voltage and current levels at the distribution networks is presented.

Finally, the study presented in this document is aimed to estimate the impact of fast charge stations in the electrical distribution network of Cuenca city.

# Keywords

Fast Charger, Electric Vehicle, Battery Model, Distribution Network, Harmonics Impact, Topologies, AC/DC Converters, DC/DC Isolated Converters, Charging Control, Power Electronics.



# Índice

## Contenido

Resumen .....	2
Palabras Clave .....	2
Abstract .....	3
Keywords.....	3
Índice.....	4
Índice de Figuras.....	6
Índice de Tablas .....	10
Agradecimientos.....	13
Dedicatoria .....	14
Glosario.....	15
CAPITULO 1: Introducción y análisis de las topologías de las estaciones de carga rápida para vehículos eléctricos .....	16
1.1 Introducción .....	16
1.2 Justificación .....	16
1.3 Objetivos.....	17
1.4 Cargadores de Vehículos eléctricos .....	18
1.5 Estaciones de Carga Rápida (Fast Chargers) .....	23
1.6 Topologías empleadas en Estaciones de Carga Rápida .....	26
CAPITULO 2: Modelamiento de topologías de estaciones de carga rápida para vehículos eléctricos .....	30
2.1 Descripción .....	30
2.2 Filtro LCL .....	30
2.3 Conversor AC/DC tipo Inversor de Fuente de Tensión (VSI).....	36
2.4 Rectificador tipo VIENNA.....	48
2.5 Modelamiento de la batería .....	53
2.6 Conversor DC/DC de Puente Completo .....	59
2.7 Conversor DC/DC Aislado de Medio Puente .....	67
2.8 Resultados de la implementación de cuatro topologías de estaciones de carga rápida.....	71



CAPITULO 3: Simulación de estaciones de carga rápida en un sistema de distribución eléctrico.....	77
3.1 Descripción .....	77
3.2 Características de la Estación de Carga Rápida a implementar.....	77
3.3 Descripción del Caso de Estudio. ....	79
3.4 Análisis Gráfico del impacto de las Estaciones de Carga.....	87
3.5 Análisis Estadístico del Impacto de las Estaciones de Carga Rápida en los Flujos de carga del Alimentador .....	95
3.6 Análisis de Armónicos generados por las Estaciones de Carga Rápida .....	101
3.7 Conclusiones del Impacto de las Estaciones de Carga Rápida en la Red de Distribución de Energía Eléctrica.....	109
CAPITULO 4: Análisis de resultados, observaciones y conclusiones .....	110
4.1 Análisis de los tipos de Cargadores de Vehículos Eléctricos.....	110
4.2 Modelamiento de Estaciones de Carga Rápida.....	110
4.3 Modelamiento de Batería de Polímero de Litio.....	111
4.4 Parámetros estudiados para la ubicación de estaciones de carga rápida.....	111
4.5 Implementación de Estaciones de Carga Rápida en una Alimentador.....	112
4.6 Próximas Líneas de Investigación en esta Área.....	113
Bibliografía .....	114



# Índice de Figuras

Figura 1.2, Cargadores para Vehículos Eléctricos [7] .....	18
Figura 1.3, Cargador Doméstico. [10] .....	19
Figura 1.4, Esquema de Cargador de Nivel 1 [9] .....	19
Figura 1.5, Cargador Nivel 2 [11] .....	20
Figura 1.6, Esquema de Cargador de Nivel 2 [9] .....	20
Figura 1.7, Cargadores Nivel 3 [12].....	21
Figura 1.8, Esquema de Cargador de Nivel 3 [9] .....	21
Figura 1.9, Modo 1 de Carga [9].....	22
Figura 1.10, Modo 2 de Carga [9].....	22
Figura 1.11, Modo 3 de Carga [9].....	23
Figura 1.12, Modo 4 de Carga [9].....	23
Figura 1.13, Configuración de una Estación de Carga Rápida [15].....	24
Figura 1.14, Conversor AC/DC controlado [1] .....	25
Figura 1.15, Curva de Carga de la Estación [16].....	26
Figura 1.16, Arquitecturas de Cargadores Rápidos [1] .....	26
Figura 1.17, Circuito Rectificador VSI [1] .....	27
Figura 1.18, Rectificador VIENNA [1] .....	28
Figura 1.19, Conversor DC/DC Puente Completo [1].....	29
Figura 1.20, Conversor DC/DC Medio Puente .....	29
Figura 2.1, Esquema de Estación de Carga.....	30
Figura 2.2, Filtro LCL Trifásico-Estrella .....	31
Figura 2.3, Diagrama Unifilar Filtro LCL .....	31
Figura 2.4, Análisis de Fourier de Corriente del rectificador VIENNA .....	34
Figura 2.5, Topología VSI.....	36
Figura 2.6, Esquema de un VSI controlado [24].....	37
Figura 2.7, $V_{MOD}$ con diferentes PWM [24] .....	37
Figura 2.8, Cuadrantes de operación del VSI [24].....	38
Figura 2.9, Rectificación de una Fase [24] .....	39
Figura 2.10, Esquema PSim® de un VSI .....	40
Figura 2.11, Modelo pequeña señal de conversor VSI trifásico .....	41
Figura 2.12, Modelo de pequeña señal, conversor VSI con desacopladores...	42
Figura 2.13, Esquema de Control para el VSI .....	43
Figura 2.14, Lazo de control de corriente activa.....	43
Figura 2.15, Lazo de control de corriente reactiva .....	44
Figura 2.16, Respuesta en frecuencia del controlador PI de corriente .....	45
Figura 2.17, Conexión conversores AC/DC y DC/DC .....	45
Figura 2.18, Diagrama de Bloques para control de Tensión .....	46
Figura 2.19, Respuesta en frecuencia del controlador PI de tensión .....	46
Figura 2.20, VSI Implementado en PSim® .....	47



Figura 2.21, Bloque de Control con lazos de Corriente y Tensión implementado en PSim® .....	47
Figura 2.22, Tensión en la Salida del conversor VSI.....	48
Figura 2.23, Distorsión Armónica de la corriente del VSI .....	48
Figura 2.24, Topología rectificador VIENNA.....	49
Figura 2.25, Posibles Modos de conducción de un VIENNA.....	49
Figura 2.26, Esquema conversor VIENNA .....	50
Figura 2.27, Esquema de Control por Histéresis.....	51
Figura 2.28, Rectificador VIENNA implementado en PSim® .....	51
Figura 2.29, Bloque de Control por Histéresis PSim® .....	52
Figura 2.30, Salida DC rectificador tipo VIENNA.....	52
Figura 2.31, Entrada AC rectificador VIENNA .....	52
Figura 2.32, Curva de Descarga de la Batería [32] .....	55
Figura 2.33, Modelo Eléctrico de la Batería [32].....	55
Figura 2.34, Esquema de Celda Li-Po en PSim® .....	56
Figura 2.35, Modulo 3.7V 77Ah en PSim® .....	56
Figura 2.36, Banco de Baterías Li-Po 355.2V-77Ah.....	57
Figura 2.37, Batería Li-Po 355.2V-77Ah Modelo Simplificado .....	57
Figura 2.38, Comportamiento del Voltaje de la Batería para velocidad de 16 y 32 Km/h .....	58
Figura 2.39, Comportamiento del Voltaje de la Batería para velocidad de 64 y 80 Km/h .....	58
Figura 2.40, Comportamiento del Voltaje de la Batería para velocidad de 120Km/h y a Potencia Máxima del motor.....	59
Figura 2.41, Topología Conversor DC/DC Puente Completo.....	60
Figura 2.42, Etapas de Funcionamiento Conversor DC/DC Puente Completo.....	60
Figura 2.43, Conversor DC/DC Puente Completo PSim® .....	61
Figura 2.44, Control de Corriente Conversor DC/DC Puente Completo.....	64
Figura 2.45, Diagrama de Bode Control de Corriente Conversor DC/DC Puente Completo.....	65
Figura 2.46, Control de Corriente Conversor DC/DC Puente Completo.....	65
Figura 2.47, Diagrama de Bode Control de Voltaje Conversor DC/DC Puente Completo.....	66
Figura 2.48, Curva de Carga de Batería Con Conversor DC/DC de Puente Completo.....	67
Figura 2.49, Topología Conversor DC/DC Medio Puente .....	67
Figura 2.50, Etapas de Funcionamiento Conversor DC/DC Medio Puente.....	68
Figura 2.51, Esquema Conversor DC/DC Medio Puente PSim® .....	68
Figura 2.52, Curva de Carga de Batería Con Conversor DC/DC de Medio Puente .....	70
Figura 2.53, Topología Rectificador VSI-Conversor Puente Completo .....	71
Figura 2.54, Comportamiento Topología Rectificador VSI-Conversor de Puente Completo.....	72



Figura 2.55, Corriente de Entrada Topología Rectificador VSI-Convertor de Puente Completo.....	72
Figura 2.56, Armónicos generados por la Topología Rectificador VSI-Convertor de Puente Completo .....	73
Figura 2.57, Topología Rectificador VSI-Convertor Medio Puente .....	74
Figura 2.58, Comportamiento Topología Rectificador VSI-Convertor de Medio Puente .....	74
Figura 2.59, Corriente de Entrada Topología Rectificador VSI-Convertor de Medio Puente .....	75
Figura 2.60, Armónicos generados por la Topología Rectificador VSI-Convertor de Medio Puente.....	75
Figura 2.61, Armónicos de la Topología VSI-Convertor Puente Completo.....	76
Figura 3.1, Modelo en CYME de una Estación de Carga Rápida.....	78
Figura 3.2, Modelo de la Carga de 4 Estaciones de Carga Rápida en CYME.....	78
Figura 3.3, Modelo de CYME para transformador.....	79
Figura 3.4, Flujograma de Decisión para localización de Estaciones de Carga.....	81
Figura 3.5, Estadio Alejandro Serrano Aguilar, ciudad de Cuenca.....	82
Figura 3.6, Centro Comercial Milenium Plaza, ciudad de Cuenca .....	82
Figura 3.7, Edificio de la Función Judicial del Azuay, ciudad de Cuenca .....	82
Figura 3.8, Parque de La Madre, ciudad de Cuenca.....	83
Figura 3.9, Clínica Santa Ana, ciudad de Cuenca.....	83
Figura 3.10, Hospital San Juan de Dios, ciudad de Cuenca .....	83
Figura 3.11, Centro Comercial “El Vergel”, ciudad de Cuenca.....	84
Figura 3.12, Área de cobertura del Alimentador #0204.....	84
Figura 3.13, Ubicación Estación de Carga Rápida.....	85
Figura 3.14, Capacidad de Líneas del Alimentador #0204.....	86
Figura 3.15, Nodos para el Análisis.....	87
Figura 3.16, Densidad de Carga Instalada Sin Estaciones de Carga Rápida.....	88
Figura 3.17, Densidad de Carga Instalada Con Estaciones de Carga Rápida.....	88
Figura 3.18, Densidad de Carga Instalada Sin Estaciones de Carga Rápida-Acercamiento .....	89
Figura 3.19, Densidad de Carga Instalada Con Estaciones de Carga Rápida-Acercamiento .....	89
Figura 3.20, Densidad de Flujo de Potencia Sin Estaciones de Carga Rápida.....	90
Figura 3.21, Densidad de Flujo de Potencia Con Estaciones de Carga Rápida.....	90
Figura 3.22, Escala de Colores para Niveles de Tensión.....	91
Figura 3.23, Niveles de Tensión Sin Estaciones de Carga .....	91
Figura 3.24, Niveles de Tensión Con Estaciones de Carga .....	92





Figura 3.25, Dirección de Flujos de Potencia Activa Sin Estaciones de Carga.....	93
Figura 3.26, Dirección de Flujos de Potencia Activa Con Estaciones de Carga.....	93
Figura 3.27, Dirección de Flujos de Potencia Reactiva Sin Estaciones de Carga.....	93
Figura 3.28, Dirección de Flujos de Potencia Reactiva Con Estaciones de Carga.....	93
Figura 3.29, Escalas de Capacidad Ocupada por las Líneas del Alimentador .....	94
Figura 3.30, Capacidad de Carga ocupada del Alimentador Sin Estaciones de Carga .....	94
Figura 3.31, Capacidad de Carga ocupada del Alimentador Con Estaciones de Carga .....	95
Figura 3.32, Análisis de Armónicos de Tensión Sin Estaciones de Carga Fase A .....	102
Figura 3.33, Análisis de Armónicos de Tensión Sin Estaciones de Carga Fase B .....	102
Figura 3.34, Análisis de Armónicos de Tensión Sin Estaciones de Carga Fase C .....	102
Figura 3.35 Análisis de Armónicos de Tensión Con Estaciones de Carga Fase A .....	103
Figura 3.36 Análisis de Armónicos de Tensión Con Estaciones de Carga Fase B .....	103
Figura 3.37 Análisis de Armónicos de Tensión Con Estaciones de Carga Fase C .....	103



# Índice de Tablas

Tabla 1, Parámetros del conversor AC/DC de tipo VSI.....	33
Tabla 2, Parámetros del conversor AC/DC de tipo VIENNA .....	34
Tabla 3, Parámetros conversor VSI .....	40
Tabla 4, Parámetros Rectificador VIENNA.....	50
Tabla 5, Tipos de Baterías usados en Vehículos Eléctricos comerciales [29]..	53
Tabla 6, Comparación de tipos de baterías [30].....	54
Tabla 7, Parámetros de la batería del Modelo.....	54
Tabla 8, Parámetros de Celda Polímero -Litio.....	55
Tabla 9, Potencia en función del a Velocidad.....	58
Tabla 10, Características del Conversor DC/DC Puente completo .....	61
Tabla 11, Características del Conversor DC/DC Medio Puente .....	68
Tabla 12, Parámetros de la Topología Rectificador VSI-Convertor de Puente Completo.....	72
Tabla 13, Armónicos de la Topología Rectificador VSI-Convertor de Puente Completo.....	73
Tabla 14, Parámetros de la Topología Rectificador VSI-Convertor de Medio Puente .....	75
Tabla 15, Armónicos de la Topología Rectificador VSI-Convertor de Medio Puente .....	75
Tabla 16, Armónicos para el modelamiento de la Estación de Carga Rápida..	77
Tabla 17, Lugares para estaciones de Carga.....	80
Tabla 18, Voltajes en Cabecera del Alimentador .....	95
Tabla 19, Flujo de Potencia en la Cabecera del Alimentador.....	96
Tabla 20, Voltajes en los Nodos.....	97
Tabla 21, Flujos de Potencia Activa .....	98
Tabla 22, Flujos de Potencia Reactiva .....	99
Tabla 23, Flujo de Potencia Aparente .....	100
Tabla 24, Capacidad Utilizada de las líneas del Alimentador.....	101
Tabla 25, Armónicos de Voltaje Sin Estación de Carga Rápida.....	104
Tabla 26, Armónicos de Voltaje Con Estación de Carga Rápida .....	105
Tabla 27, Cambios en los Armónicos de Voltaje por las Estaciones de Carga Rápida .....	106
Tabla 28, Armónicos de Corriente Sin Estación de Carga Rápida.....	107
Tabla 29, Armónicos de Corriente Con Estación de Carga Rápida.....	108
Tabla 30, Cambios en los Armónicos de Corriente Con Estación de Carga Rápida .....	108



Universidad de Cuenca

Cláusula de licencia y autorización para publicación en el Repositorio Institucional

---

Yo Santiago Eduardo Siavichay Morocho en calidad de autor y titular de los derechos morales y patrimoniales del trabajo de titulación "MODELADO DE ESTACIONES DE CARGA RÁPIDA PARA VEHÍCULOS ELÉCTRICOS Y SUS EFECTOS EN UN SISTEMA DE DISTRIBUCIÓN DE ENERGÍA ELÉCTRICA", de conformidad con el Art. 114 del CÓDIGO ORGÁNICO DE LA ECONOMÍA SOCIAL DE LOS CONOCIMIENTOS, CREATIVIDAD E INNOVACIÓN reconozco a favor de la Universidad de Cuenca una licencia gratuita, intransferible y no exclusiva para el uso no comercial de la obra, con fines estrictamente académicos.

Asimismo, autorizo a la Universidad de Cuenca para que realice la publicación de este trabajo de titulación en el repositorio institucional, de conformidad a lo dispuesto en el Art. 144 de la Ley Orgánica de Educación Superior.

Cuenca, Noviembre 2017

---

Santiago Eduardo Siavichay Morocho

C.I: 0104690813



Yo Santiago Eduardo Siavichay Morocho, autor del trabajo de titulación "MODELADO DE ESTACIONES DE CARGA RÁPIDA PARA VEHÍCULOS ELÉCTRICOS Y SUS EFECTOS EN UN SISTEMA DE DISTRIBUCIÓN DE ENERGÍA ELÉCTRICA ", certifico que todas las ideas, opiniones y contenidos expuestos en la presente investigación son de exclusiva responsabilidad de su autor.

Cuenca, Noviembre 2017

---

Santiago Eduardo Siavichay Morocho

C.I: 0104690813



# Agradecimientos

A mi director de tesis PhD. Luis González quien con su gran trabajo y orientación ha sido un ejemplo a seguir en el desarrollo de este trabajo de tesis.

A la Empresa Eléctrica Regional CENTROSUR por brindar las facilidades de información y el uso de sus licencias informáticas.

Al Ing. Felipe Saldaña del departamento SIGADE de la CENTROSUR por la valiosa ayuda prestada la implementación de este proyecto en los sistemas de distribución de la ciudad de Cuenca.



# Dedicatoria

A Dios que ha sabido acompañarme en cada paso que doy, a mis padres Santiago y Fanny, quienes desde pequeño me apoyaron de forma incondicional, enseñándome buenos valores y sobre todo la perseverancia, gracias a ellos he podido lograr una etapa más de mi vida profesional.

A mi hermano Pedro que es un ejemplo de perseverancia y esfuerzo.

A toda mi familia y amigos que fueron un pilar fundamental demostrándome cariño y apoyo.



# Glosario

AC/DC.- Corriente Alterna a Corriente Directa.

CAN.- Protocolo de comunicación entre la estación de carga y el vehículo eléctrico.

CYME.- Software de Análisis de Redes Eléctricas.

EV.- Vehículo eléctrico.

GFI.- Interruptor de falla a tierra.

IEC.- Comisión Electrotécnica Internacional.

IGBT.- Transistor Bipolar de Puerta Aislada.

kW.- Kilovatio.

kWh.- Kilovatio Hora.

Li-Po.- Polímero-Litio.

PWM.- Modulador de Ancho de Pulso.

SAE.- Sociedad de Ingenieros Automotrices.

SoC.- Estado de carga (State of Charge).

THD.- Distorsión armónica.

VIENNA.- Tipo de Rectificador que utiliza histéresis para la conversión.

VSI.- Inversor de Fuente de Voltaje.

VSI.- Inversor Trifásico de Fuente de Tensión.



# CAPITULO 1

## Introducción y análisis de las topologías de las estaciones de carga rápida para vehículos eléctricos

### 1.1 Introducción

Con la revolución tecnológica vivida la última década y como respuesta al preocupante aumento del uso de los combustibles fósiles y sus repercusiones medioambientales, se ha visto al automóvil eléctrico como una muy buena alternativa para reducir la dependencia de los combustibles derivados del petróleo. Es por ello que en el año 2009 con la entrada al mercado del auto eléctrico Tesla Roadster por parte de la compañía estadounidense Tesla, Inc. se dio inicio a la masificación del uso de los automóviles eléctricos, por lo que grandes multinacionales como General Motors, Nissan, KIA, Toyota, etc. han lanzado sus propias versiones de autos eléctricos que cada día aumentan en ventas y en países donde se los usa.

Producto de este aumento, diversas ciudades del mundo han visto la necesidad de implementar sistemas de abastecimiento eléctrico para dichos vehículos análogos a las gasolineras que se usan para autos de combustión. Dando lugar al concepto de estaciones de carga rápida o “electrolineras”, las cuales permiten cargar las baterías de un auto eléctrico en pocos minutos.

Las estaciones de carga rápida son aquellas que cargan al vehículo con corriente continua a potencias superiores a 19.2kW [1]. En el caso de que varias de estas estaciones estén conectadas en la red de distribución funcionando de manera simultánea, se genera la necesidad de conocer los impactos que tendrán en el sistema de distribución eléctrico de una ciudad. Por esta razón en este documento se analiza el modelamiento desde el punto de vista de la electrónica de potencia las estaciones de carga y la implementación de varias estaciones de carga en una red distribución.

### 1.2 Justificación

Debido al cambio de la matriz energética del país [2] que ha impulsado el estado ecuatoriano en la última década, se introdujeron grandes proyectos de generación de energía que ampliarían la capacidad de producción energética del país a 6799 MW [3]. Con este considerable aumento en la generación de energía, el Ecuador ha lanzado múltiples incentivos para reemplazar el consumo





de derivados de petróleo por el uso de energía eléctrica, siendo el sector del transporte el mayor consumidor de combustibles fósiles con un consumo del 84% de la energía total del país [4]. Por esta razón, se han aprobado varios proyectos nacionales que buscan introducir y masificar el uso de vehículos eléctricos [5].

Ciudades como Cuenca y Loja han dado los primeros pasos que buscan introducir vehículos eléctricos en sus calles [6][7], por lo que se han planteado múltiples incentivos al uso del auto eléctrico. Sin embargo, un factor determinante en un sistema de movilidad de automóviles eléctricos es el sistema de recarga de los mismos, denominados comúnmente electrolineras o estaciones de carga rápida, las cuales constan principalmente de un convertidor de potencia AC/DC que permite cargar la batería del vehículo eléctrico en un corto tiempo.

Una característica importante de las estaciones de carga rápida es que la potencia manejada por éstas, se encuentra en el orden de algunas decenas de kilovatios suministrados por la red de distribución pública de energía, y al ser dispositivos conmutados de electrónica de potencia, estos generan contaminación armónica dado a sus no linealidades y dinámicas transitorias que pueden comprometer el desempeño de la calidad de la energía eléctrica en su entorno.

Es por ello que esta tesis, centra el análisis y modelamiento de diversos tipos de topologías de electrónica de potencia de las estaciones de carga para vehículos eléctricos a fin de conocer su comportamiento frente a distintos tipos de operación bajo condiciones de carga y observar su efecto mediante la simulación en herramientas de software sobre el sistema de distribución en el entorno donde se encuentran estas estaciones.

### 1.3 Objetivos

#### Generales

Analizar el impacto de las estaciones de carga rápida de vehículos eléctricos sobre un sistema de distribución de energía eléctrica

#### Específicos

1. Estudio comparativo de topologías asociadas a estaciones de carga rápida para vehículos eléctricos.
2. Modelado de topologías de estaciones de carga rápida.
3. Simulación de un sistema de distribución de energía eléctrica ante la inclusión de estaciones de carga rápida.
4. Estudio del impacto de las estaciones de carga rápida en un sistema de distribución de energía eléctrica.

## 1.4 Cargadores de Vehículos eléctricos

Los cargadores de vehículos eléctricos son los que se encargan de proveer y controlar la energía que se transfiere a la batería del auto eléctrico, así como el nivel de carga de la misma, a fin de extender la vida útil de la batería y mantener condiciones de operación adecuada en la red de distribución eléctrica. Para esto se utilizan diversos elementos de control y de electrónica de potencia que se han ido perfeccionando en los últimos años.

Dependiendo de las necesidades, se pueden instalar cargadores de autos eléctricos en lugares tan comunes como casas, centros comerciales, restaurantes, edificios de oficinas, etc. o en lugares destinados únicamente para la carga de autos eléctricos denominados estaciones de carga rápida. Debido a que existen muchos tipos de cargadores con diferentes tecnologías, marcas, niveles de voltaje, formas de control, potencias, etc. se ha visto necesario la implementación de normas, las cuales clasifican a los cargadores según su nivel o según su modo.



*Figura 1.1, Cargadores para Vehículos Eléctricos [8]*

### 1.4.1 Categorización de las estaciones de carga de autos eléctricos

Con el fin de establecer una normativa que permita la estandarización entre las diferentes marcas de cargadores de autos eléctricos, la Sociedad de Ingenieros Automotrices (SAE) y la Comisión Electrotécnica Internacional (IEC) han establecido que los distintos tipos de cargadores eléctricos se categoricen según sus niveles de potencia y según el modo de carga, siendo estos los siguientes.

#### 1.4.1.1 Niveles de Potencia

La SAE en su publicación "SAE Surface Vehicle Recommended Practice J1772, SAE Electric Vehicle Conductive Charge Coupler", establece varios aspectos sobre las tecnologías de cargadores, especificaciones eléctricas, protocolos de carga y además realiza una clasificación de los cargadores en función de sus

niveles de potencia. Según la norma SAE J1772 se tienen los siguientes 3 niveles de potencia para cargadores de autos eléctricos [9].

### Nivel 1

Este nivel es usado en redes eléctricas domésticas con niveles de voltaje de 120V de una sola fase protegidos con breakers y con interruptor de falla a tierra. El cargador de baterías se encuentra en el vehículo eléctrico. La instalación de este tipo de cargadores cuesta algunos cientos de dólares.

Este tipo de cargadores tiene una potencia de aproximadamente 2kW y maneja 12A [10], lo que se ve reflejado en un tiempo de carga del auto eléctrico de entre 6 y 24 horas. Se utiliza un tipo especial de cable para conectarlo a la red de energía como muestra la Figura 1.2.



Figura 1.2, Cargador Doméstico. [11]

Los cargadores constan de convertidores AC/DC, DC/DC que generalmente se encuentran dentro del vehículo ON-Board, y contienen circuitos de corrector de factor de potencia, control de carga y varios filtros. En la Figura 1.3 se muestra un esquema del funcionamiento de este tipo de cargador.

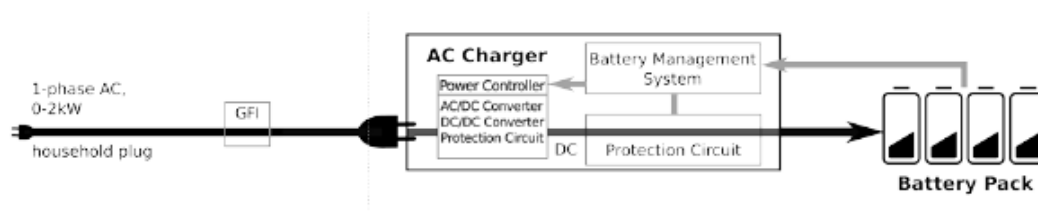


Figura 1.3, Esquema de Cargador de Nivel 1 [10]

### Nivel 2

Emplea conexión monofásica o trifásica de entre 208 y 240V de corriente alterna, la estación de carga es protegida con interruptor de falla a tierra [10]. El cargador de baterías se encuentra a bordo del vehículo eléctrico y utiliza una conexión de carga como la de la Figura 1.4.



Figura 1.4, Cargador Nivel 2 [12]

En este tipo de estaciones, se establecen comunicaciones con el auto eléctrico mediante el conector de carga del vehículo, el cual está regulado por las normas IEC62196-2 Tipo 2, IEC 62196-2 Tipo 3 entre otras.

La potencia a la que operan este tipo de estaciones de aproximadamente 7.6kW con una corriente máxima de 32A. Esto implica que las baterías de auto tardan entre 2 y 8 horas en completar la carga.

El corrector de factor de potencia, el conversor AC/DC, el conversor elevador DC/DC, los filtros y el control de carga se integran dentro de la estación de carga. La Figura 1.5 muestra la configuración de este tipo de cargador.

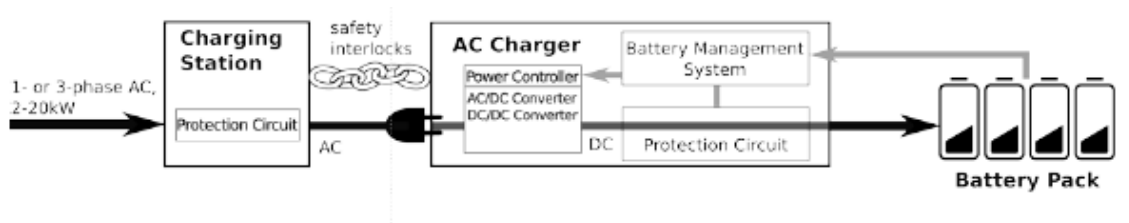


Figura 1.5, Esquema de Cargador de Nivel 2 [10]

### Nivel 3

En esta categoría se encuentran las denominadas estaciones de carga rápida, que son objeto de estudio en este documento. La potencia máxima que admite este nivel es de hasta 240kW con corrientes de hasta 400A. El voltaje que proveen estas estaciones es de tipo DC y llega hasta los 600 V.[10]

En este caso la batería está cargada directamente con corriente continua desde la estación de carga.



Figura 1.6, Cargadores Nivel 3 [13]

Al ser una estación que maneja potencias relativamente altas, se tienen varios elementos de protección e incorpora controlador de factor de potencia, conversor AC/DC, conversor DC/DC variable que se conecta directamente al cargador del auto eléctrico. La estación de carga se comunica con el cargador del auto eléctrico mediante protocolo CAN. El conector usado en estas estaciones está bajo las normas SAE J1772, CHAdeMo, IEC 62196 tipo 2, entre otros. La Figura 1.7 muestra la configuración de este tipo de estación de carga.

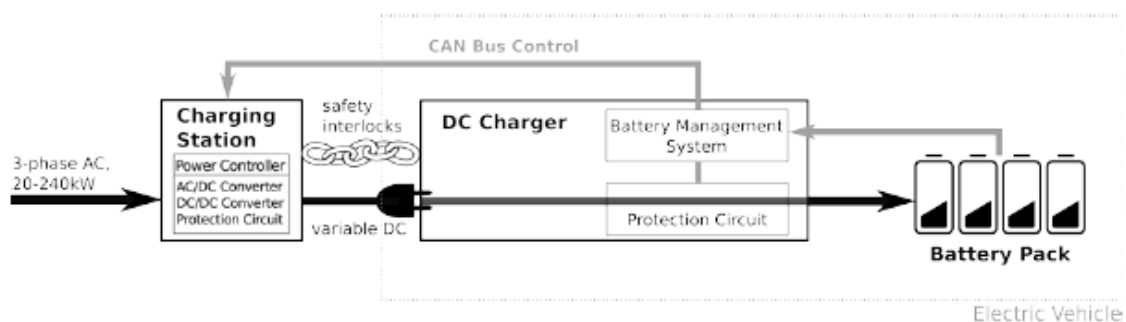


Figura 1.7, Esquema de Cargador de Nivel 3 [10]

#### 1.4.1.2 Categorización según Modos de Carga

El modo de carga se define por el protocolo de comunicación que se tiene entre la estación de carga y el vehículo eléctrico. Este tipo de categorización se indica en la norma IEC 61851-1 ("Vehicle Conductive Charging System - Part 1: General requirements"). En esta norma se definen diferentes señales para comunicar datos sobre la carga entre la estación y el vehículo, generalmente usando PWM. [10]

### Modo 1

El auto eléctrico es conectado a la fuente AC mediante un conector doméstico con una potencia máxima de 13.3kW por el cual no circulan más de 16A con un voltaje máximo de 250V en una toma monofásica, o hasta 480V en una toma trifásica. Este modo requiere tanto protección de sobre corriente como protección de falla a tierra. Cabe destacar que no se requiere de pines de control y es muy simple, razón por la que está prohibido en algunos países. La Figura 1.8 muestra la configuración de este modo de carga.

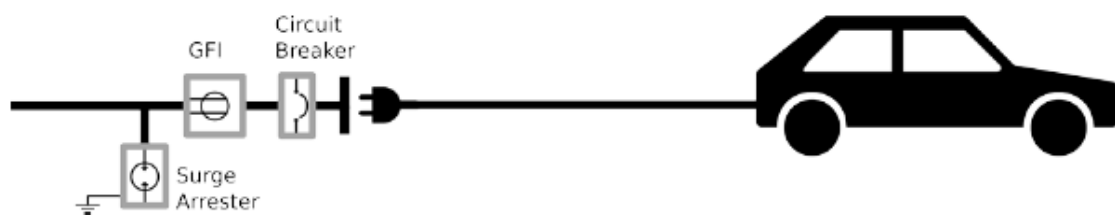


Figura 1.8, Modo 1 de Carga [10]

### Modo 2

Se considera modo 2 a una estación de carga de hasta 26.6kW que no supera los 32A con un voltaje AC máximo de 250V monofásico o 480V trifásico. Debe tener protección de sobrecorriente, protección de falla a tierra y protección de corriente residual. El sistema de control de carga se implementa a través del cable de carga de la estación como muestra la Figura 1.9.

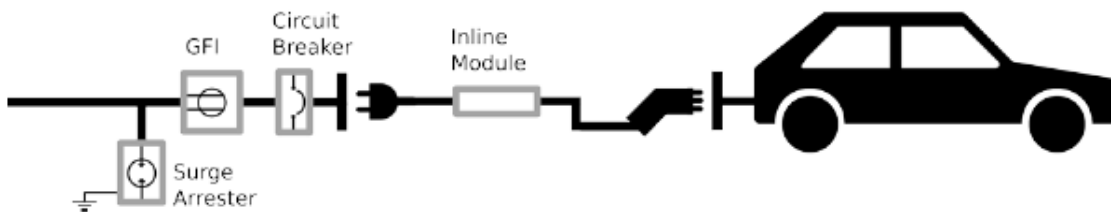


Figura 1.9, Modo 2 de Carga [10]

### Modo 3

En este modo, la estación de carga maneja hasta 184.4kW con una corriente máxima de 250A y está conectado permanentemente a una fuente trifásica dedicada. El sistema de control de carga gobierna el cargador del auto mediante el pin de comunicación con la estación. [14]

La norma IEC 61851-1 exige la implementación de pines para comunicación y control dentro del conector de carga de la estación. Además, requiere protección



sobre corriente y un interruptor de falla a tierra (GFI). Como lo explica la Figura 1.10.

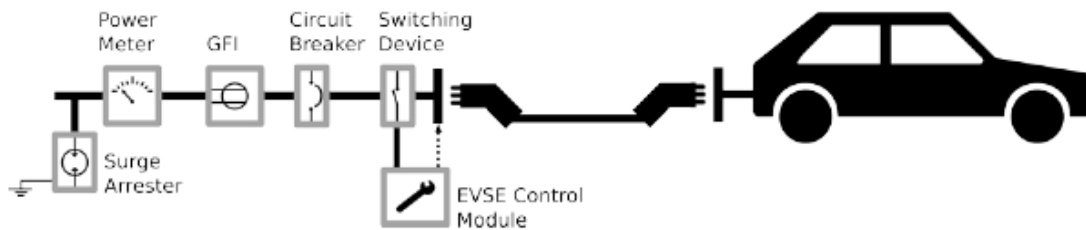


Figura 1.10, Modo 3 de Carga [10]

#### Modo 4

El modo 4 de carga se utiliza en estaciones de carga rápida que proveen corriente DC para cargar directamente las baterías del automóvil, su potencia es de hasta 240kW con una corriente de 400A. [10]

Se requieren pines en el conector de carga para establecer comunicaciones entre el automóvil y la estación de carga. Además, se requiere que se este tipo de estaciones tengan aislamiento galvánico, así como protecciones de sobrecorriente, interruptor de puesta a tierra y protecciones tanto en el lado AC como en el lado DC. La Figura 1.11 muestra la configuración de una de estas estaciones.

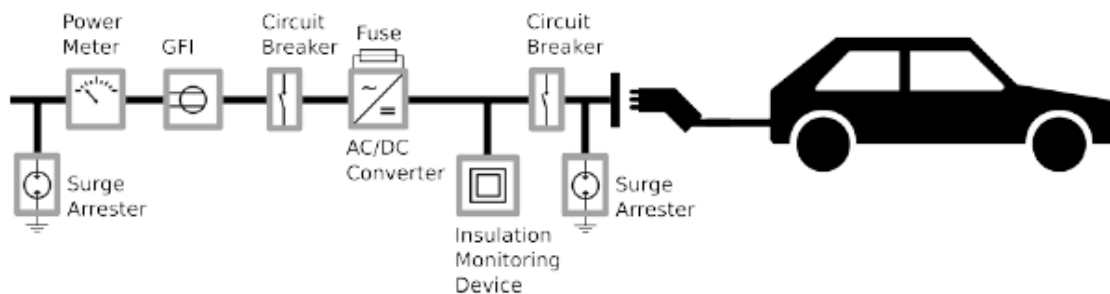


Figura 1.11, Modo 4 de Carga [10]

Los conectores de este modo de carga están regulados en la SAE J1772, IEC 62196-2 Tipo 2, CHAdeMO, entre otros.

#### 1.5 Estaciones de Carga Rápida (Fast Chargers)

La estación de carga rápida tiene vital importancia para la masificación del uso de autos eléctricos. Con este tipo de estaciones se estima que la carga de 0% a un 80% de la batería del vehículo eléctrico tarda entre 15 y 30 minutos dependiendo de la estación de carga y del vehículo. [15]

La estación de carga rápida se alimenta directamente de la red de distribución a través de un transformador de distribución trifásico. La potencia que entrega está entre los 20kW y 240kW, y con tensiones de entre 200V y 600V dependiendo del estado de carga de la batería. En el caso del estándar CHADEMO uno de los más populares se dispone de un voltaje entre 50 y 500VDC y corrientes entre 0 y 125A limitados por las condiciones de carga, bien sea si se está en el modo de corriente constante o voltaje constante.

### 1.5.1 Funcionamiento de una Estación de Carga Rápida

Según la norma IEEE Std 2030.1.1-2015, la configuración recomendada para una estación de carga rápida es la que se ve en la Figura 1.12, en donde se tiene un rectificador AC/DC que se conecta a la red de energía, un conversor DC/DC aislado que permite crear un link de corriente directa con voltaje variable para cargar la batería, protección de corriente inversa, equipos de medición y control del cargador [16].

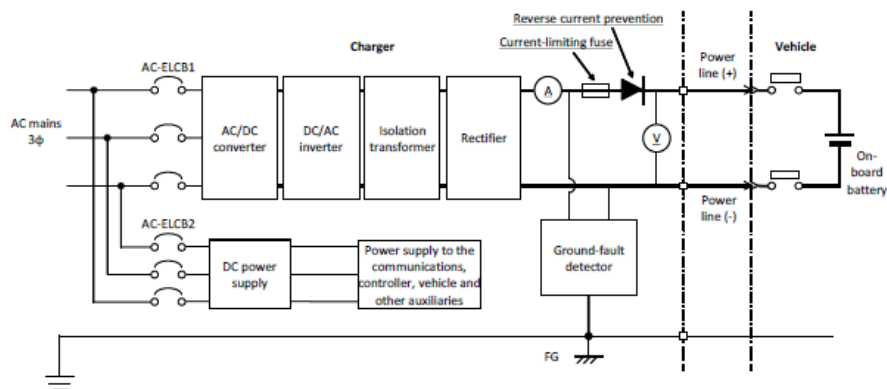


Figura 1.12, Configuración de una Estación de Carga Rápida [16]

### Fuente de Corriente AC

Generalmente la estación de carga rápida se alimenta del sistema de distribución eléctrica por medio de un transformador trifásico, el cual está conectado en configuración triángulo estrella a fin de aislar galvánicamente la estación de carga del resto del sistema de distribución.

### Convertidor AC/DC

Esta parte se encarga de convertir la corriente trifásica alterna que se recibe del transformador de distribución en corriente continua, para esto es común usar puentes de diodos o elementos de rectificación controlados. La Figura 1.13 muestra un rectificador trifásico controlador, que generalmente usa IGBTs, los



cuales son controlados por distintas técnicas y una de las más populares en la de modulación por ancho de pulso PWM.

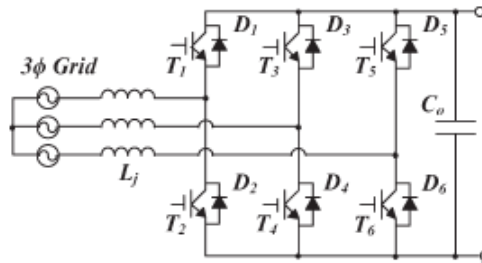


Figura 1.13, Conversor AC/DC controlado [1]

### Conversor DC/DC

El conversor DC/DC es el que se encarga de generar un bus de tensión DC variable que permite controlar la potencia con la que se carga la batería.

### Inversor DC/AC

El inversor se encarga de convertir la corriente continua del conversor DC/DC y convertirla en corriente alterna de alta frecuencia.

### Transformador de asilamiento

Es un transformador de alta frecuencia que permite asilar galvánicamente la batería del vehículo eléctrico del resto de la red. Este transformador es más pequeño que uno de distribución y tiene una eficiencia mayor, esta propiedad está dada básicamente por operar a frecuencia superiores a la de red de distribución.

Para esto se suelen usar distintas topologías de electrónica de potencia que permiten elevar o reducir el voltaje DC de la salida con respecto a la entrada DC del conversor.

### Carga de la batería

A fin de cargar la batería, se utilizan dos tipos de control, el control por corriente y el control por voltaje.

El control de carga por corriente, que se encarga de proveer una corriente constante de carga a la batería hasta que esta alcanza el 80% aproximadamente de su estado de carga nominal, durante este tipo de carga, la batería se carga más rápidamente, como indica la curva verde de la Figura 1.14.[17]

Control de carga por voltaje es el que se encarga de cargar la batería cuando su estado de carga supera el 80%, en este lapso, la corriente varía mientras que el voltaje de carga se mantiene constante, como indica la curva azul de la Figura 1.14.

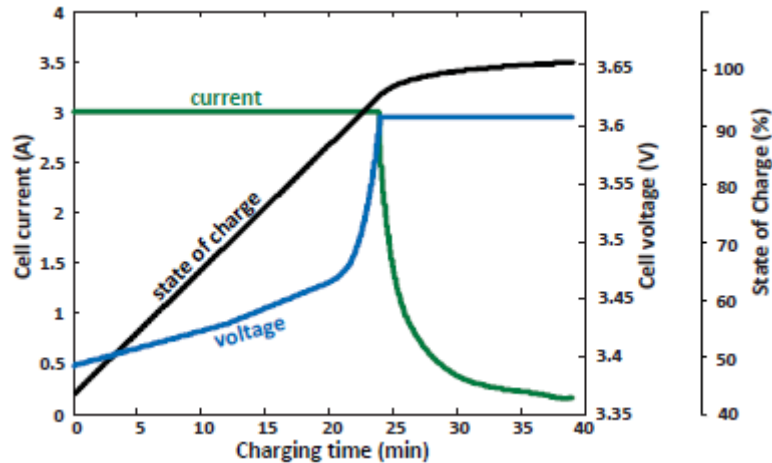


Figura 1.14, Curva de Carga de la Estación [17]

## 1.6 Topologías empleadas en Estaciones de Carga Rápida

Las estaciones de carga rápida emplean más de 20kW de potencia en el estado de carga con control de corriente constante y por motivos de costo, eficiencia, etc. se encuentran fuera del vehículo eléctrico.

Comúnmente existen estaciones de carga rápida para varios automóviles, las cuales pueden tener alimentación común de corriente alterna o alimentación común de corriente continua, tal como se observa en la Figura 1.15.

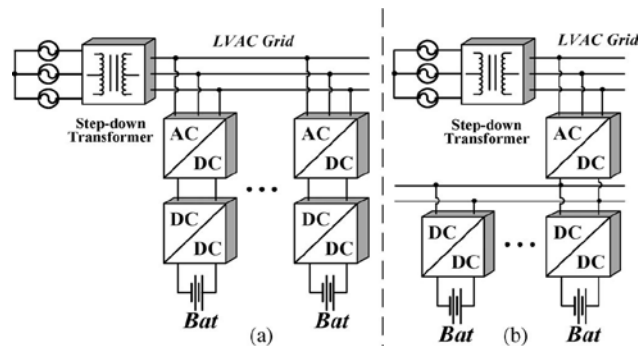


Figura 1.15, Arquitecturas de Cargadores Rápidos (a) Alimentación Individual (b) Alimentación Común [1]

En cuanto a la electrónica de potencia empleada en las estaciones de carga, esta se puede dividir en dos partes principales. La primera corresponde a la rectificación AC/DC y la segunda en la conversión DC/DC que se encarga de

entregar un nivel de tensión DC variable en la salida. A continuación, se presentan las topologías más utilizadas para cada una de las dos etapas.

### 1.6.1 Convertidor AC/DC

Según la norma IEEE Std 2030.1.1.2015 el rectificador AC/DC de una estación de carga rápida debe estar diseñado para operar con corriente trifásica, reducir al máximo la distorsión armónica, aumentar al máximo el factor de potencia y usar el mínimo posible de elementos pasivos y activos. Es por ello que a continuación se analizan las dos topologías que mejor cumplen dichas características. Además, la eficiencia de conversión debe ser superior al 90% con un factor de potencia de no menos de 0.95. [16]

#### Inversor de Fuente de Voltaje VSI (Voltage Source Inverted)

Este convertidor bidireccional trabaja con tres fases y usa 6 interruptores de estado sólido tal como muestra la Figura 1.16, esta topología toma ventaja de los inductores de entrada para mantener una corriente constante y además permite aumentar los niveles de voltaje en la salida. [18]

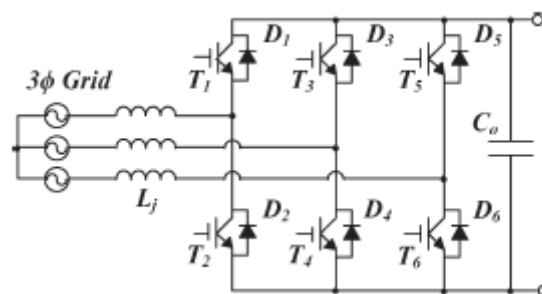


Figura 1.16, Circuito Rectificador VSI [1]

Esta topología usa generalmente transistores de potencia o IGBTs con diodos anti paralelo, los cuales son controlados mediante PWM a fin de regular la tensión DC en la salida. La tensión DC tiene una frecuencia de rizo de seis veces la frecuencia de la corriente AC de la entrada. Un rasgo importante de este tipo de conversor es que su eficiencia puede llegar a cerca del 99% en condiciones óptimas además de tener una distorsión armónica muy reducida inferior al 1.6%. [19]

#### Rectificador VIENNA

Es un conversor unidireccional que permite aumentar el voltaje de salida DC con respecto al voltaje AC de entrada. La característica principal de esta topología es que usa solamente 3 interruptores controlados, además permite controlar el factor de potencia. [20]

La Figura 1.17 muestra el uso de 18 diodos, 3 switch y dos capacitores para el correcto funcionamiento del rectificador.

La ventaja de esta topología es que solamente requiere de 3 interruptores de estado sólido que pueden ser IGBT, tiristores o transistores. Además, se tienen tres niveles de voltaje en la salida del rectificador. La configuración de este rectificador minimiza el estrés sobre sus elementos de conmutación y permite que tenga una alta eficiencia energética, así como una baja absorción de reactivos.

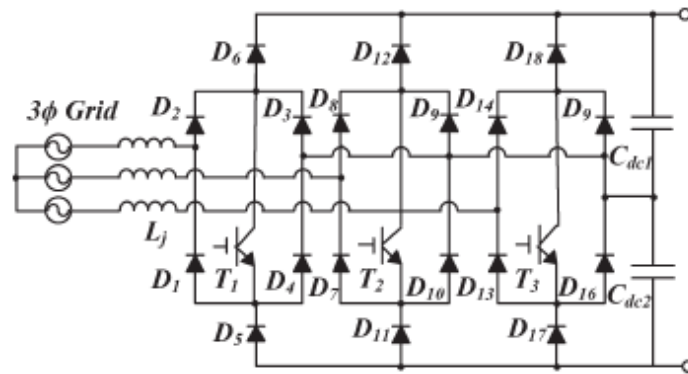


Figura 1.17, Rectificador VIENNA [1]

Debido a su configuración, esta topología puede funcionar únicamente como rectificador y su capacidad de aportar reactivos a la red es muy limitada.

### 1.6.2 Conversor DC/DC

Según la norma IEEE Std 2030.1.1.2015, se requiere que el conversor DC/DC tenga aislamiento galvánico y permita voltajes de salida entre 50V y 500V, así como la capacidad de manejar corrientes de entre 0 y 125A. [16]

A fin de implementar el aislamiento galvánico se usa un transformador de alta frecuencia que permite reducir el tamaño de los elementos del conversor, pues estos trabajan a mayor frecuencia, reflejándose en una mayor eficiencia.

Las dos topologías que se usan más comúnmente son las siguientes.

#### Conversor DC/DC de Puente Completo

Este conversor DC/DC aislado de puente completo, lo que hace es convertir la corriente continua en corriente alterna con frecuencia del orden de los KHz mediante un puente H controlado, para luego mediante un transformador de alta frecuencia aislar galvánicamente el rectificador AC/DC que se compone de un puente de diodos, una inductancia y un capacitor tal como se observa en la Figura 1.18

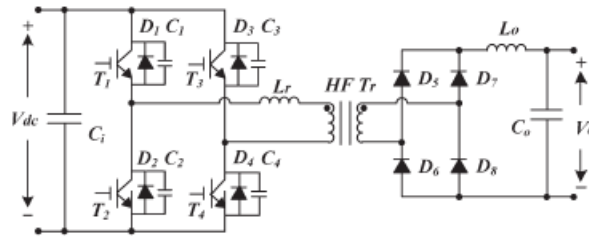


Figura 1.18, Conversor DC/DC Puente Completo [1]

Una de las ventajas que tiene este conversor es la de usar las capacitancias parásitas de los elementos semiconductores y la inductancia del transformador de alta frecuencia para entrar en resonancia sin usar componentes adicionales.[1]

Esta topología garantiza una alta eficiencia cuando se encuentra a plena carga, la cual se da hasta que el estado de carga de la batería del vehículo eléctrico llega al 80% de su capacidad nominal, sin embargo, al cargar la batería con menos potencia disminuye la eficiencia del conversor.

### Conversor DC/DC de Medio Puente

Este conversor tiene la ventaja de trabajar con altos voltajes de entrada y además tiene una alto nivel de eficiencia. Esta topología requiere de un capacitor de resonancia ( $C_2$ ), un inductor de resonancia ( $L_1$ ) que es la inductancia del transformador, ver Figura 1.19. Llegando a tener una eficiencia de hasta 98%.

El voltaje en la salida de este conversor depende mucho de la frecuencia de control de los semiconductores que generalmente es de unos cuantos kHz

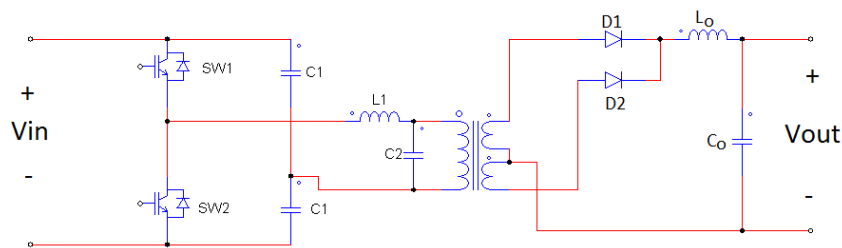


Figura 1.19, Conversor DC/DC Medio Puente

## CAPITULO 2

### Modelamiento de topologías de estaciones de carga rápida para vehículos eléctricos

#### 2.1 Descripción

En este capítulo se modelan distintas topologías de estaciones de carga rápida para vehículos eléctricos a fin de conocer su comportamiento eléctrico y obtener un modelo que sea fácil de simular en un sistema de distribución eléctrico.

El diagrama de bloques que se utiliza para el modelamiento de estaciones de carga rápida se puede observar en Figura 2.1 en donde se tiene un filtro pasivo LCL, un rectificador controlado AC/DC que puede ser un Inversor de Fuente de Voltaje (VSI) o un rectificador controlado VIENNA, un convertor aislado DC/DC de Puente Completo o de Medio Puente y un modelo aproximado a los valores reales de una batería de Polímero-Litio.

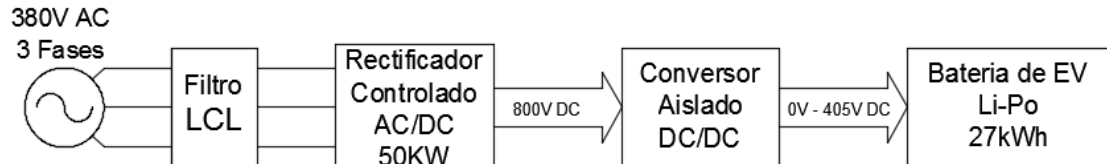


Figura 2.1, Esquema de Estación de Carga

En cuanto a los aspectos técnicos de la estación de carga, ésta se alimenta con corriente alterna trifásica de 380V fase-fase y potencia nominal de 50kW, tendrá una salida de corriente continua variable para la carga de la batería entre 50 y 500V [16]. A continuación, se describen cada una de estas etapas para el diseño de la estación de carga rápida.

#### 2.2 Filtro LCL

Este filtro consta de dos inductores conectados a un capacitor tal como muestra la Figura 2.2, el filtro se encarga de reducir los armónicos generados por el convertor AC/DC y se encuentra entre la alimentación de corriente trifásica del convertor y la salida del transformador de distribución.

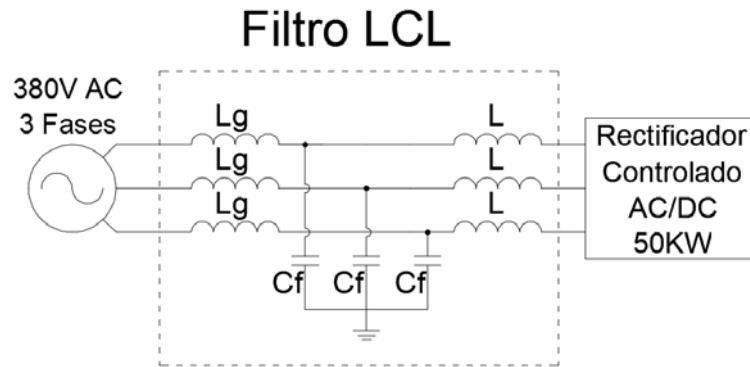


Figura 2.2, Filtro LCL Trifásico-Estrella

Este tipo de filtro es empleado en aplicaciones de potencia que están en el orden de las decenas de kilovatios debido a su bajo costo en comparación a los filtros activos. Se usa generalmente para eliminar armónicos de corriente de entre 2kHz y 150kHz según la norma IEEE 519-2014.

Otra de las ventajas es que permite usar valores pequeños de inductancias y capacitores, reduciendo así su costo.

#### 2.2.1 Método de cálculo de los valores del Filtro LCL

A continuación se resume el método empleado para calcular los valores de un filtro LCL mostrado en [21] y en [22] tomando como referencia las denominaciones de inductancias y capacitor mostradas en la Figura 2.3.

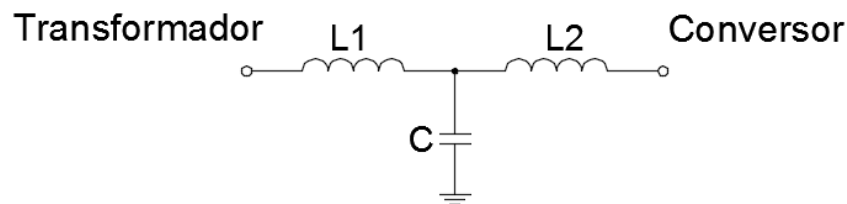


Figura 2.3, Diagrama Unifilar Filtro LCL

#### Cálculo de la Impedancia $L_1$

Para calcular el inductor  $L_1$  se usa la ecuación 1 tomada de [22] que establece el valor máximo que puede tener  $L_1$ .

$$L_1 \leq \frac{0.05 * V_{linea} * \delta}{\Delta i_{out} * f_{sw}} \quad (1)$$



En donde:

$V_{\text{línea}}$  es el voltaje de entre fases de la alimentación de corriente alterna.

$\delta$  es el ancho de pulso máximo que tendrá el PWM del conversor.

$\Delta i_{\text{out}}$  es la corriente máxima de rizado que se espera.

$f_{\text{sw}}$  es la frecuencia de conmutación del conversor.

#### Cálculo de la Impedancia $L_2$

En consideración a [22], se establece que la inductancia  $L_2$  debe cumplir con la ecuación 2 que establece un rango de valores posibles para  $L_2$  en función de  $L_1$ .

$$\frac{1}{10} L_1 \leq L_2 \leq \frac{1}{5} L_1 \quad (2)$$

#### Cálculo del Capacitor

El capacitor se calcula mediante la ecuación 3 tomada de [22].

$$C = \frac{Q_c}{2\pi * f_{\text{red}} * V_{\text{línea}}^2} \quad (3)$$

En donde:

$V_{\text{línea}}$  es el voltaje entre fases de la alimentación de corriente alterna.

$f_{\text{red}}$  es la frecuencia de la red eléctrica.

$Q_c$  representa la potencia absorbida por el filtro, normalmente entre el 15% y 25% de la potencia activa del conversor

#### Frecuencia de Resonancia

La frecuencia de resonancia se la obtiene mediante la ecuación 4 y [21] recomienda que esta frecuencia de resonancia este entre diez veces la frecuencia de la red y la mitad de la frecuencia de conmutación.

$$f_0 = \frac{1}{2\pi} * \sqrt{\frac{L_1 + L_2}{L_1 * L_2 * C}} \quad (4)$$





### 2.2.2 Cálculo de los Parámetros del Filtro LCL para el convertidor AC/DC tipo VSI

Los parámetros involucrados en el cálculo del filtro LCL se muestran en la Tabla 1, que corresponden a los valores empleados en la simulación del convertidor AC/DC con topología VSI.

DESCRIPCION	VALOR
Potencia	50KW
Frecuencia de conmutación	5KHz
Frecuencia de la Red	60Hz
Voltaje Línea – Línea trifásico	380V
Porcentaje máximo de corriente de rizo	5%
Máximo Ancho de PWM ( $\delta$ )	0.77

Tabla 1, Parámetros del convertidor AC/DC de tipo VSI

Cálculo  $L_1$ , para el convertidor VSI.

Con la ecuación 1 con los valores de la Tabla 1, se calculan los valores para  $L_1$ :

Donde:

$$\Delta i_{out} = 5\% * I_{pico} = 5\% * \frac{50KW}{380V * \sqrt{3}} * \sqrt{2} = 5.37A$$

Entonces:

$$L_1 \leq 0.55mH$$

En este caso se ha determinado que  $L_1=0.55mH$ .

Cálculo  $L_2$ , para el convertidor VSI.

Usando la ecuación 2 con los valores de la Tabla 1, se calculan los valores máximos y mínimos para  $L_2$ :

$$55\mu H \leq L_2 \leq 110\mu H$$

En este caso se ha determinado que se usará el valor de  $L_2=78.8\mu H$ .

Cálculo de C, para el convertidor VSI.

Usando la ecuación 3, en conjunto con la Tabla 1 se calcula el valor para el capacitor:

En donde:

$$Q_c = 25\% * P_{convertor} = 25\% * 50kW = 12.5kW$$

Entonces:

$$C = 229\mu F$$

En este caso, se usa  $C=220\mu F$  que es el valor comercial más cercano.

Cálculo de la Frecuencia de Resonancia, convertidor VSI

Utilizando la ecuación 4 y los valores determinados para  $L_1$ ,  $L_2$ , y  $C$  anteriormente se obtiene que la frecuencia de resonancia es:

$$f_0 = 1266.81 \text{ Hz}$$

Este valor cumple con la condición de ser mayor a diez veces la frecuencia de red (600Hz) y ser menor a la mitad de la frecuencia de conmutación (2.5KHz).

2.2.3 Cálculo de los Parámetros del Filtro LCL para el conversor AC/DC tipo VIENNA.

Debido a que este tipo de conversor AC/DC no posee una frecuencia de conmutación fija, se ha realizado un análisis de frecuencias con la Transformada de Fourier mostrada en la Figura 2.4 en donde se ha determinado que la frecuencia donde se muestran mayor cantidad de armónicos es a partir de los 1.2KHz. Los parámetros involucrados en el cálculo del filtro LCL se muestran en la Tabla 2, estos parámetros han sido determinados en función de pruebas en el simulador.

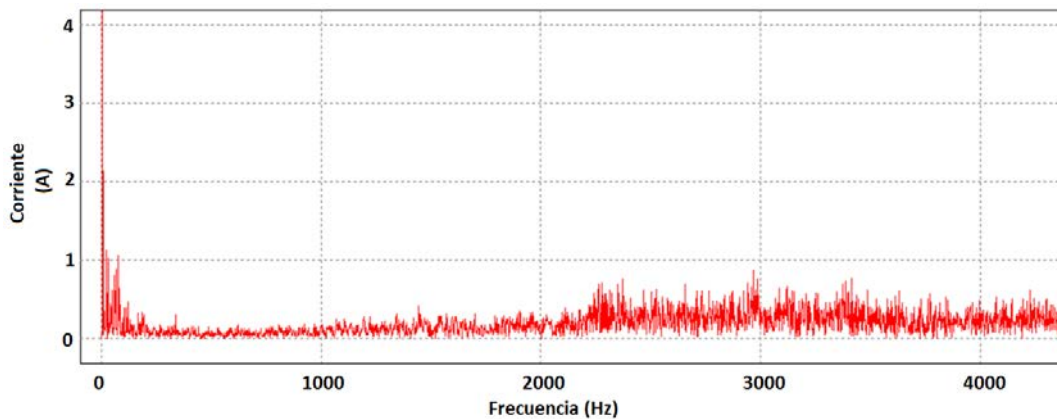


Figura 2.4, Análisis de Fourier de Corriente del rectificador VIENNA

DESCRIPCION	VALOR
Potencia	50KW
Frecuencia de conmutación ( <i>Estimada</i> )	1.2KHz
Frecuencia de la Red	60Hz
Voltaje Línea – Línea trifásico	380V
Porcentaje máximo de corriente de rizo	5%
Máximo Ancho de PWM ( $\delta$ )	0.77

Tabla 2, Parámetros del conversor AC/DC de tipo VIENNA



Cálculo  $L_1$ , para el convertidor VIENNA.

Usando la ecuación 1 con los valores de la Tabla 2, se calculan los valores de  $L_1$ :

Donde:

$$\Delta i_{out} = 5\% * I_{pico} = 5\% * \frac{50KW}{380V * \sqrt{3}} * \sqrt{2} = 5.37A$$

Entonces:

$$L_1 \leq 136.22\mu H$$

En este caso se ha determinado que  $L_1=136\mu H$ .

Cálculo  $L_2$ , para el convertidor VIENNA.

Usando la ecuación 2 con los valores de la Tabla 2, se calculan los valores máximos y mínimos para  $L_2$ :

$$13.6\mu H \leq L_2 \leq 27.2\mu H$$

En este caso se ha fijado un valor de  $L_2=19\mu H$ .

Cálculo de  $C$ , para el convertidor VIENNA.

Usando la ecuación 3 en conjunto con la Tabla 1 se calculan los valores para el capacitor:

En donde:

$$Q_c = 25\% * P_{convertor} = 25\% * 50kW = 12.5kW$$

Entonces:

$$C = 229\mu F$$

En este caso, se usa  $C=220\mu F$  que es el valor comercial más cercano.

Cálculo de la Frecuencia de Resonancia, Convertidor VIENNA

Usando la ecuación 4, en conjunto con los valores calculados anteriormente se tiene que la frecuencia de resonancia para el filtro pasa bajo es:

$$f_0 = 82kHz$$

El valor de  $f_0$  cumple con la condición de ser mayor a diez veces la frecuencia de red (600Hz) y sin embargo al no existir una frecuencia de conmutación fija no se puede establecer un parámetro de la frecuencia máxima de conmutación.

## 2.3 Conversor AC/DC tipo Inversor de Fuente de Tensión (VSI)

Este conversor tendrá un voltaje de entrada AC trifásico con voltaje línea-línea de 380V, que se ha elegido basándose en [23] y se encuentra dentro del rango de los valores más comunes para estaciones de carga rápida comerciales. La potencia de diseño es de 50kW con una salida de voltaje DC constante de 800V.

A fin de reducir el ruido, los cargadores comerciales cuentan con distintos sistemas de filtros pasivos. Es por ello que se usa un filtro pasivo LCL en la alimentación de corriente alterna de cada inversor, el cual ya ha sido calculado y explicado en la sección 2.2.2

### 2.3.1 Topología del conversor AC/DC tipo VSI

El conversor trifásico VSI (Inversor de Fuente de Tensión) tiene la topología mostrada en la Figura 2.5, la cual permite el manejo de corrientes sinusoidales con baja distorsión, control sobre el factor de potencia, mayor eficiencia y un flujo de potencia bidireccional.[24]

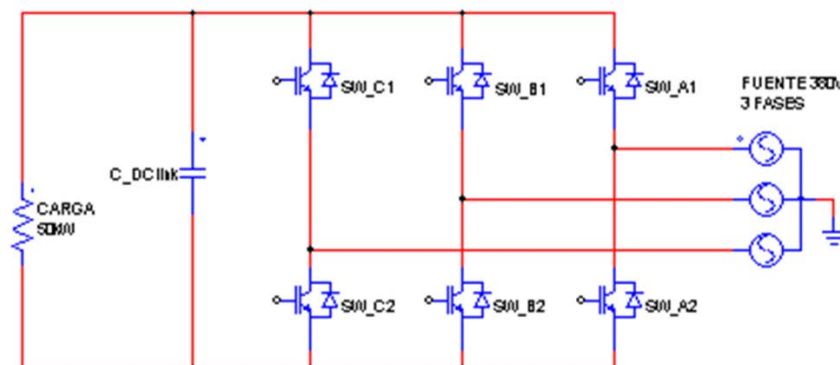


Figura 2.5, Topología VSI

El conversor VSI consta de 6 interruptores de estado sólido controlados por ancho de pulso (PWM) y un capacitor ( $C_{DC\_Link}$ ) que se encarga de eliminar el voltaje de rizado en el Bus de enlace de continua ó DC\_Link.

### 2.3.2 Funcionamiento del conversor VSI

El conversor VSI toma la corriente alterna de una fuente trifásica y la convierte en corriente continua. Una característica importante de esta topología es que funciona como un conversor elevador, es decir el voltaje DC de la salida será mayor que el voltaje AC de la entrada. Este conversor permite manejar potencia activa y reactiva, permitiendo controlar el factor de potencia y también reduce la inyección de armónicos a la red.

El conversor VSI puede utilizar lazos de control clásicos y una modulación PWM para su funcionamiento a partir de un bloque de control, que activan o desactivan los transistores IGBT, tal como se muestra en la Figura 2.6 a fin de mantener un voltaje DC constante en la salida.

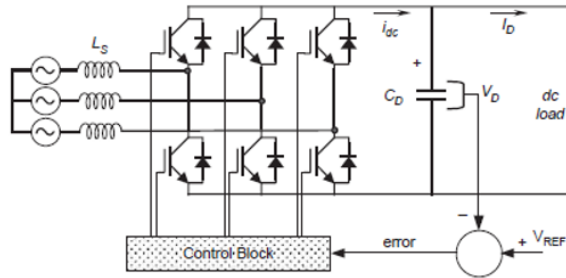


Figura 2.6, Esquema de un VSI controlado [25]

En este esquema de control, se compara al voltaje de salida con un voltaje de referencia, generando así una señal de error que permite encender o apagar los seis transistores.

Cuando la corriente  $I_D$  es positiva, el capacitor  $C_D$  se descarga y la señal de error pide al bloque de control más potencia desde la fuente AC. Para esto se usan señales PWM adecuadas en los transistores, así aumenta la corriente desde la fuente AC hacia el lado DC y el voltaje del capacitor aumenta.

### Operación del VSI

Para esto se usa una señal PWM a una frecuencia de conmutación de 5kHz que modula una señal fundamental de 60Hz denominada  $V_{MOD}$  que tiene la misma frecuencia de la red eléctrica, aunque puede variar en amplitud y fase dependiendo de la forma de la señal PWM tal como muestra la Figura 2.7.

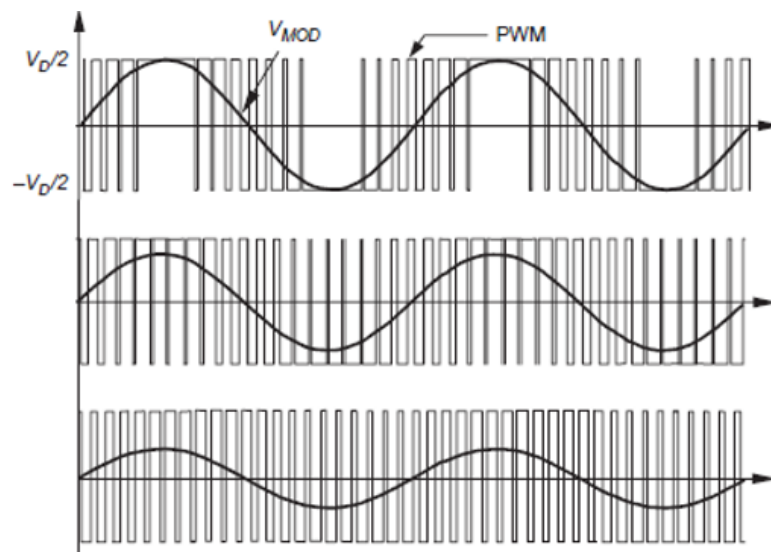


Figura 2.7,  $V_{MOD}$  con diferentes PWM [25]

El funcionamiento del VSI, depende fundamentalmente de las características que tenga el  $V_{MOD}$ , para esto se recomienda mirar la Figura 2.8. En el primer caso correspondiente a la gráfica “b” de la Figura 2.8 se tiene que  $V_{MOD}$  está en fase con la corriente sinusoidal  $I_s$  de la fuente AC, esto implica que el factor de potencia será unitario, y el VSI está funcionando como rectificador. En el segundo caso correspondiente a la gráfica “c” de la Figura 2.8,  $V_{MOD}$  está desfasado  $180^\circ$  con la corriente sinusoidal  $I_s$ , esto implica que el factor de potencia será unitario y el VSI está funcionando como inversor. En el tercer caso correspondiente a la gráfica “d” de la Figura 2.8,  $V_{MOD}$  está desfasado  $90^\circ$  en adelante con respecto a la corriente sinusoidal  $I_s$ , esto implica que el VSI actúa como un capacitor entregando potencia reactiva. Por último, en el cuarto caso correspondiente a la gráfica “e” de la Figura 2.8,  $V_{MOD}$  está desfasado  $90^\circ$  en atraso con respecto a la corriente sinusoidal  $I_s$ , esto implica que el VSI actúa como un inductor absorbiendo potencia reactiva.

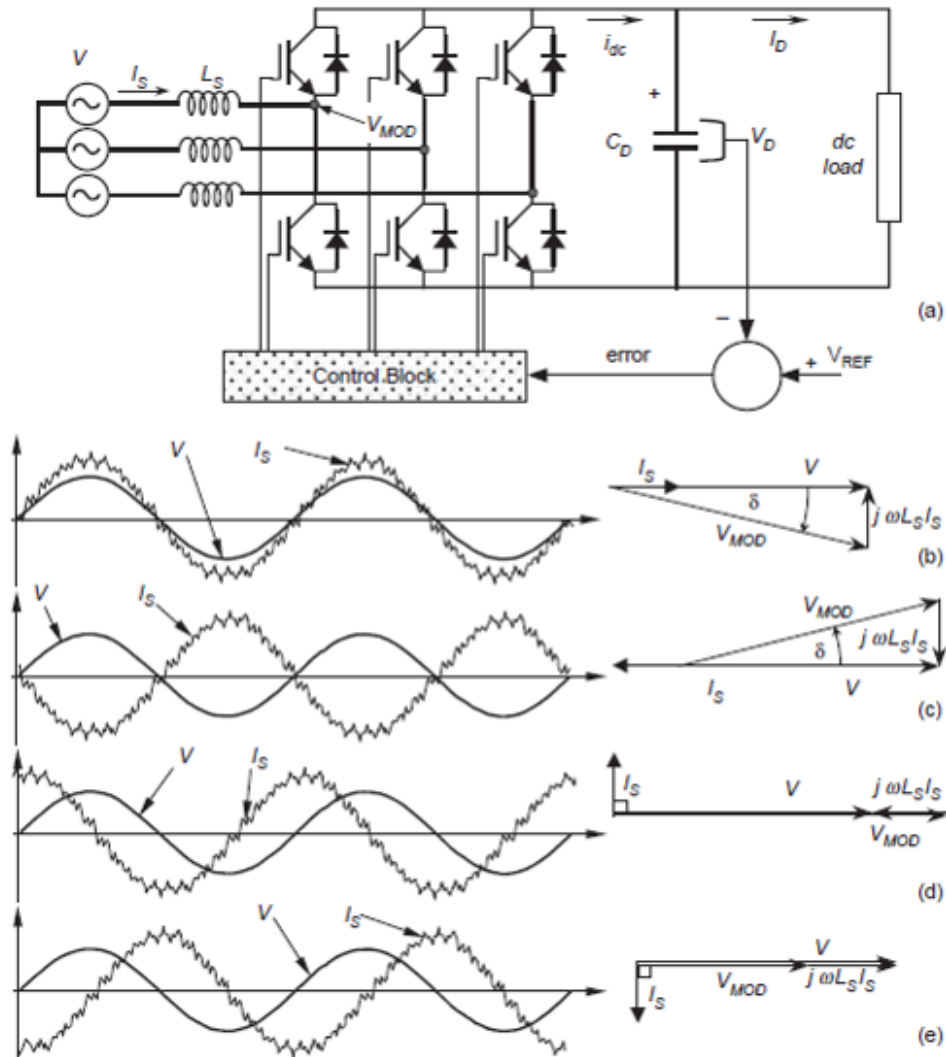


Figura 2.8, Cuadrantes de operación del VSI [25]

## Funcionamiento de los IGBT en una fase

Para explicar el funcionamiento de los IGBT, se utiliza como referencia la Figura 2.9 que corresponde a una sola fase, y la operación de los mismos se extenderá a las demás fases.

La corriente  $I_s$  fluye a través de los IGBT mostrados en la Figura 2.9, durante el hemisiclo positivo, el transistor  $T_n$  se encuentra activado por lo tanto  $I_s$  fluye a través del mismo y retorna a la fuente a través del diodo  $D_n$ . Cuando  $T_n$  está inactivo, el paso de la corriente se interrumpe y la corriente empieza a fluir a través del diodo  $D_p$ , esta es la corriente  $I_{Dp}$  que va directamente a la parte positiva de la salida DC contribuyendo a la corriente  $I_{dc}$ , la cual carga el capacitor  $C_D$  y permite producir corriente continua. Las inductancias  $L_s$  son muy importantes en este proceso porque genera un voltaje inducido que permite la conducción del diodo  $D_p$ . En el semiciclo negativo ocurre algo similar con el IGBT  $T_p$  y los diodos  $D_n$  y  $D_p$ .

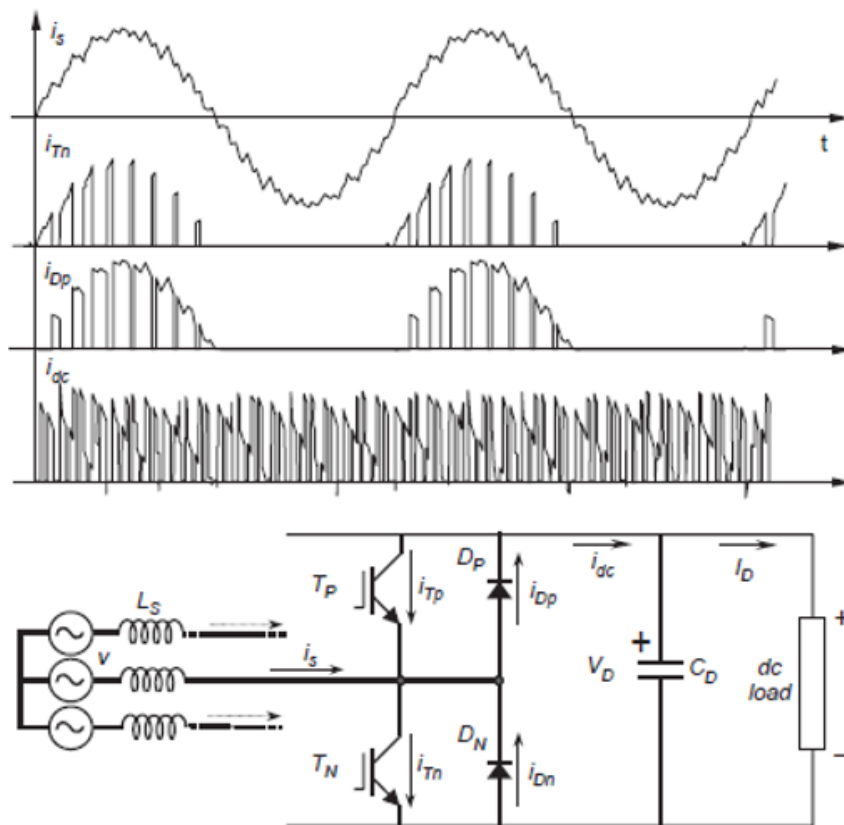


Figura 2.9, Rectificación de una Fase [25]

A fin de que el VSI funcione adecuadamente, los seis diodos deben estar polarizados negativamente con respecto a la fuente AC. Para mantener los diodos bloqueados es necesario que el voltaje de la salida DC del conversor sea mayor que la tensión pico en cada diodo.

### 2.3.3 Diseño del VSI

A fin de conocer el comportamiento de un convertidor VSI, se ha implementado esta topología en el simulador de circuitos de electrónica de potencia *PSim®* con las características del convertor en la Tabla 3.

Potencia	50kW
Frecuencia de Conmutación	5kHz
Voltaje trifásico de entrada	380 V
Voltaje DC de Salida	800 V

Tabla 3, Parámetros convertor VSI

En la Figura 2.10 se muestra un esquema general del convertor implementado en el simulador y a continuación se explica el esquema empleado en la simulación, el sistema de control y el funcionamiento bajo condiciones de potencia nominal.

#### Esquema General

El esquema usado para esta simulación se puede observar en la Figura 2.10, y a continuación se explica cada parte del mismo.

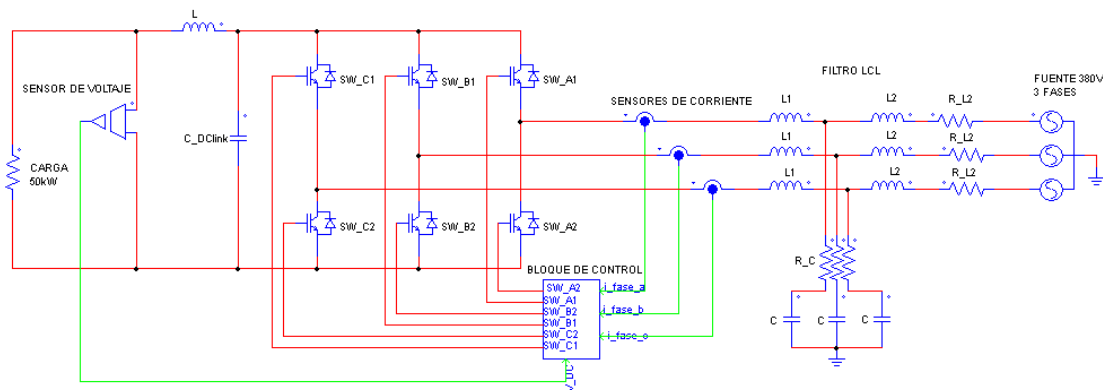


Figura 2.10, Esquema PSim® de un VSI

Primero tenemos una fuente de tensión trifásica con voltaje nominal de 380V para alimentar al convertor VSI pasando por el filtro LCL calculado en la sección 2.2.2 que reduce la distorsión armónica, con  $R_{L2}=0.1\Omega$  correspondiente a la resistencia estimada asociada al inductor y  $R_C=0.17\Omega$  que es la resistencia en serie estimada asociada al capacitor.

Luego se tienen los sensores de corriente que junto al sensor de voltaje envían información al bloque de control, el cual se encarga de medir las corrientes de entrada de cada fase y generar las señales PWM para los IGBTs, esta parte se analiza con más detalle en la sección 2.3.



A continuación, existen 6 transistores IGBT que permitirán realizar la rectificación controlada y serán los elementos que manejen la potencia del conversor al aplicar las técnicas de control analizadas en el punto anterior.

Por último, se ha utilizado un capacitor  $C_{DClink}$  de  $4700\mu F$  y un inductor parásito de la DC link  $L$  con valor  $0.0001\mu H$  que se encargan de mantener el voltaje y estabilizar la corriente continua en salida del conversor respectivamente.

#### 2.3.4 Diseño del control del VSI

En esta sección se muestra el proceso y métodos usados para implementar el control del conversor VSI que consta de un lazo de control de corriente y otro de control de voltaje mediante controladores clásicos del tipo Proporcional + Integral (PI).

##### Modelado del Conversor

El modelo de pequeña señal del conversor trifásico se ha establecido mediante el uso de la transformada de Park [26], con lo que se logra que las tres corrientes de las fases a, b y c se expresen en sus componentes d, q y 0. En donde la componente "0" es nula debido a que es un sistema trifásico balanceado. La componente "d" tiene un valor de 0 cuando la corriente y el voltaje de entrada están en fase. Y la componente "q" al controlar su amplitud permite controlar la potencia que entrega el conversor.

Con estas consideraciones, se ha establecido el modelo de pequeña señal mostrado en la Figura 2.11 que está basado en [27] y tomado de [24] con la ecuaciones 5 y 6 correspondientes.

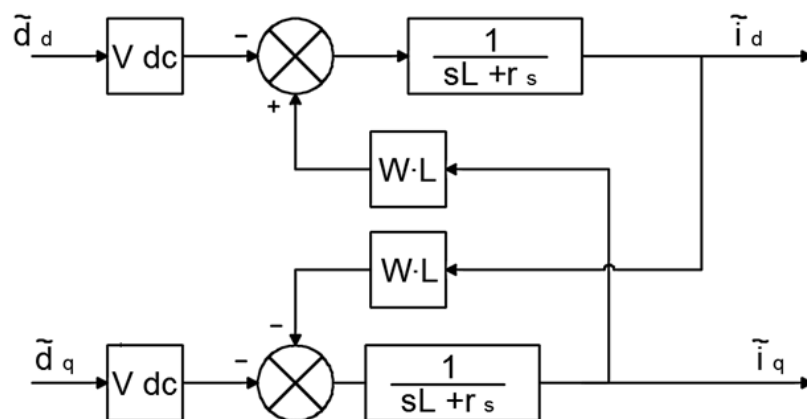


Figura 2.11, Modelo pequeña señal de conversor VSI trifásico

$$\tilde{i}_d = \frac{WL\tilde{i}_q - \tilde{d}_d V_{dc}}{(sL + r_s)} \quad (5)$$

$$\tilde{i}_q = \frac{-WL\tilde{i}_d - \tilde{d}_q V_{dc}}{(sL + r_s)} \quad (6)$$

En las ecuaciones 5 y 6, las corrientes de salida están acopladas entre sí por  $WL\tilde{i}_q$  y por  $-WL\tilde{i}_d$ . Esto supone un inconveniente al momento de controlar las corrientes d y q, por ello se ha visto la necesidad de convertir la función de transferencia en varios sistemas de una entrada y una salida utilizando las técnicas de desacoplo de [28]. De esta manera se obtiene el modelo de la Figura 2.12.

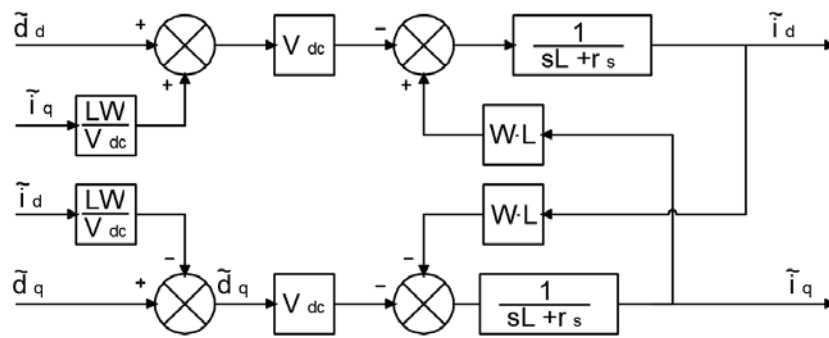


Figura 2.12, Modelo de pequeña señal, conversor VSI con desacopladores

Por medio de la técnica de desacoplo, se elimina la interrelación entre las componentes de corriente “d” y “q”, de esta manera se obtienen las ecuaciones 7 y 8 que serán usadas en los cálculos de las siguientes secciones.

$$\tilde{i}_d = \frac{-\tilde{d}_d V_{dc}}{(sL + r_s)} \quad (7)$$

$$\tilde{i}_q = \frac{-\tilde{d}_q V_{dc}}{(sL + r_s)} \quad (8)$$

### Esquema de control

Con el fin de mantener un voltaje constante de 800V DC en la salida el conversor, se ha visto necesario implementar un esquema de control formado por dos lazos, uno de corriente y otro de voltaje que se encargan de regular la señal del modulador PWM. Este sistema de control se muestra en la Figura 2.13 y a continuación se explica el funcionamiento de estos lazos.

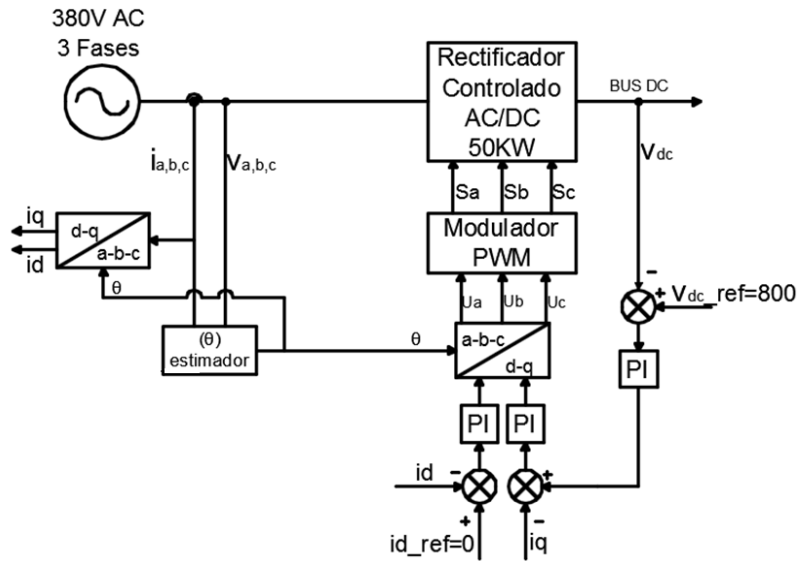


Figura 2.13, Esquema de Control para el VSI

### Lazo de control de corriente

El lazo de control de corriente busca mantener la potencia reactiva igual a cero y además regula la modulación PWM de los IGBTs para mantener un voltaje de 800V en la salida DC del conversor.

Para este fin, se ha aplicado la transformada de Park explicada en [26] que permite descomponer las corrientes de las fases  $I_a$ ,  $I_b$  e  $I_c$  del conversor en sus componentes " $I_d$ ", " $I_q$ " e " $I_o$ ", haciendo que sea más fácil implementar un control de tipo PI, pues se sabe que el conversor VSI es una carga balanceada y por lo tanto su componente " $I_o$ " es cero. El valor de  $I_d$  debe ser igual a cero para que el factor de potencia sea unitario y la corriente " $I_q$ " es la que permitirá controlar la potencia que consume el conversor.

Por esta razón se puede decir que el lazo de corriente asociado a  $I_q$  controla la corriente activa y el lazo asociado a la corriente  $I_d$  controla la potencia reactiva. El modelo del lazo de control de las corrientes está dado por la Figura 2.14 y Figura 2.15, donde  $G_{cd}$  y  $G_{cq}$  son las funciones de transferencia de los controladores y los parámetros  $\beta_d$  y  $\beta_q$  son las ganancias asociadas las corrientes  $i_d$  e  $i_q$  respectivamente.

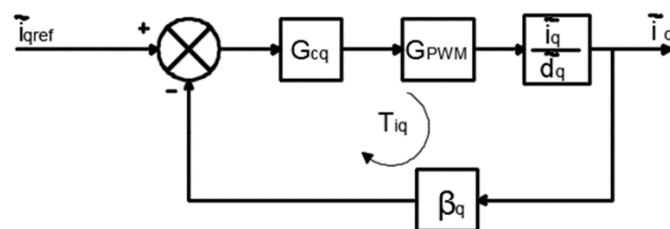


Figura 2.14, Lazo de control de corriente activa

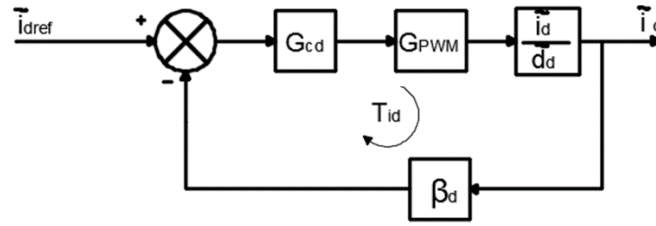


Figura 2.15, Lazo de control de corriente reactiva

Las ganancias de lazo están dadas por las ecuaciones 9 y 10.

$$T_{id} = \beta_d \cdot G_{cd} \cdot G_{pwm} \cdot \frac{-V_{dc}}{LS + r_s} \quad (9)$$

$$T_{iq} = \beta_q \cdot G_{cq} \cdot G_{pwm} \cdot \frac{-V_{dc}}{LS + r_s} \quad (10)$$

### Sintonización de Lazo de Corriente

Para sintonizar el lazo de corriente, se deben tomar en cuenta las ecuaciones 9 y 10, en donde  $\beta_d=1$  y  $\beta_q=1$ . Las funciones  $G_{cd}$  y  $G_{cq}$  corresponden al controlador proporcional integral PI. La función de transferencia del PWM toma el valor de la amplitud pico-pico que en este caso es  $G_{cd}=1$ . Además, se tiene que  $V_{dc}=800$ ,  $L=550\mu H$  y por cuestiones prácticas se ha determinado que el valor de  $r_s=1m\Omega$ .

Al reemplazar estos valores en las ecuaciones 9 y 10, se obtienen las siguientes funciones de transferencia:

$$T_{id} = 1 * \left( Kp + \frac{Ki}{s} \right) * 1 * \frac{800V}{550\mu H s + 1m\Omega}$$

$$T_{iq} = 1 * \left( Kp + \frac{Ki}{s} \right) * 1 * \frac{800V}{550\mu H s + 1m\Omega}$$

A partir de las ecuaciones de transferencia, se ha procedido a sintonizar los valores de  $K_i$  y de  $K_p$  mediante el criterio de asignación de polos y ceros utilizando la herramienta SISOTool de MatLab.

Para esto se debe cumplir que la frecuencia de corte sea cercana a la mitad de la frecuencia de conmutación de los IGBTs que es de 2.5kHz, el margen de fase debe ser mayor a  $60^\circ$  y el margen de ganancia debe ser mayor a 6db.

Luego de realizar el proceso debido, y según el diagrama de bode mostrado en la Figura 2.16, se tiene una frecuencia de corte de 2.22kHz, un margen de ganancia infinito y un margen de fase de  $90^\circ$  para  $K_i=0.276$  y  $K_p=0.00966$ .

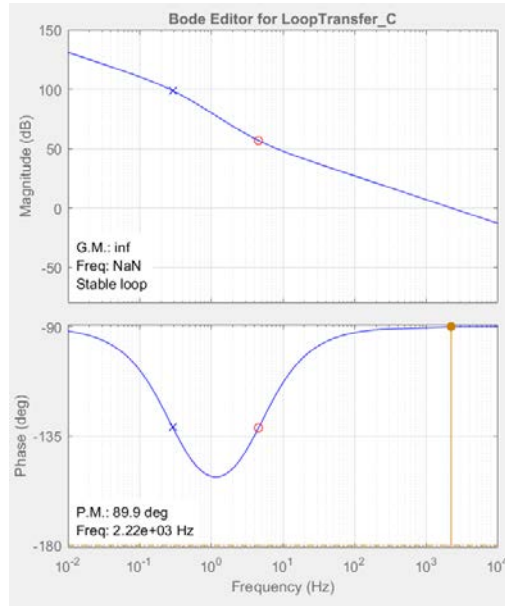


Figura 2.16, Respuesta en frecuencia del controlador PI de corriente

### Lazo de control de voltaje

Este lazo de control se encarga de mantener una tensión constante DC de 800V en la salida DC del convertor AC/DC. Para conseguir esto, se hace uso de un control PI que se puede ver implementado en Figura 2.13 y que se encarga de regular junto al lazo control de corriente la amplitud de la componente de corriente  $I_q$  del esquema de control que a su vez permite controlar el voltaje DC en la salida.

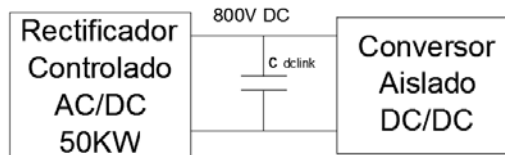


Figura 2.17, Conexión conversores AC/DC y DC/DC

Para diseñar este lazo de control, es necesario contar con el modelo del convertor que relacione el voltaje DC de la salida con la corriente  $I_q$  del convertor. La ecuación 11, representa el balance de energía en el capacitor encargado de mantener la tensión en la salida. Si se asume como perturbación las variaciones de corriente manejadas por el convertor, la ecuación de pequeña señal en el bus de continua está dado por la ecuación 12 si se desprecian las variaciones del rectificador controlado.

$$\frac{C_{dclink} V_{dc}}{dt} = i_{ac/dc} - i_{dc/dc} \quad (11)$$

$$\frac{v_{dc}}{i_q} = -\frac{D_q}{C_{dclink} s} \quad (12)$$

Para realizar el lazo de control de tensión, se ha optado por implementar un controlador de tipo PI cuyo esquema se puede observar en la Figura 2.18 en donde la ecuación 13 es su ecuación de transferencia correspondiente.

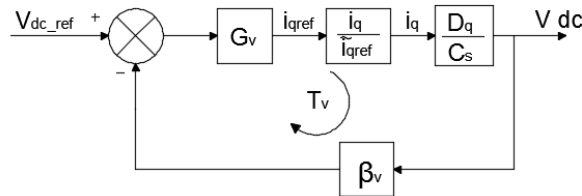


Figura 2.18, Diagrama de Bloques para control de Tensión

$$T_v = \beta_v + G_v - \frac{v_{dc}}{I_q} \quad (13)$$

### Sintonización de Lazo de Voltaje

Para sintonizar el lazo de voltaje, se debe tomar en cuenta la ecuación 13 con  $\beta_v=1$ . La función  $G_v=k_p + k_i/s$  es la que representa el control PI y el valor de C es de 4700 $\mu$ F. Los criterios para la sintonización del lazo de control implican que la frecuencia de cruce por cero debe ser inferior a la décima parte de la frecuencia de corte fijada en los lazos de control de corriente, es decir menor a 222Hz. La frecuencia de corte escogida es de 120 Hz. El margen de fase debe ser mayor a 60° y el margen de ganancia debe ser mayor a 6db.

A partir de la ecuación de transferencia, se ha procedido a sintonizar los valores de  $K_i$  y de  $K_p$  mediante la herramienta SISOTool de MatLab obteniendo los resultados mostrados en la Figura 2.19.

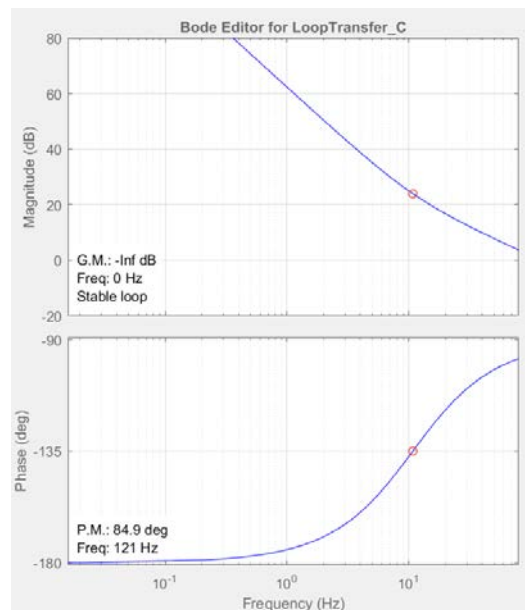


Figura 2.19, Respuesta en frecuencia del controlador PI de tensión

Luego de realizar el proceso debido y según el diagrama de Bode mostrado en la Figura 2.19 se tiene una frecuencia de corte de 121kHz, un margen de ganancia infinito y un margen de fase de  $84.9^\circ$  para  $K_i=3.656$  y  $K_p=247.32$ .

### 2.3.5 Resultados de la Implementación en *PSim*®

Tomando en cuenta los diferentes esquemas de control, topologías, etc. diseñados en los puntos anteriores, se ha implementado el convertor VSI en el simulador de circuitos de electrónica de potencia *PSim*®, estos esquemas se pueden observar en la Figura 2.20 y en la Figura 2.21

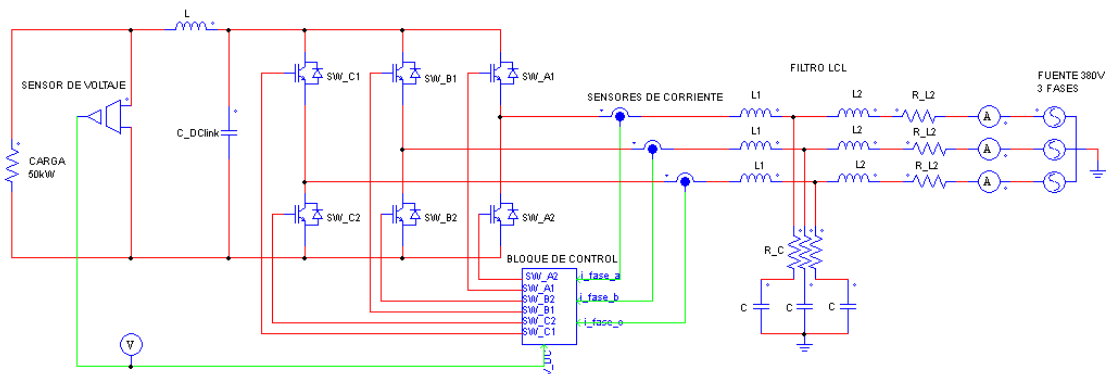


Figura 2.20, VSI Implementado en *PSim*®

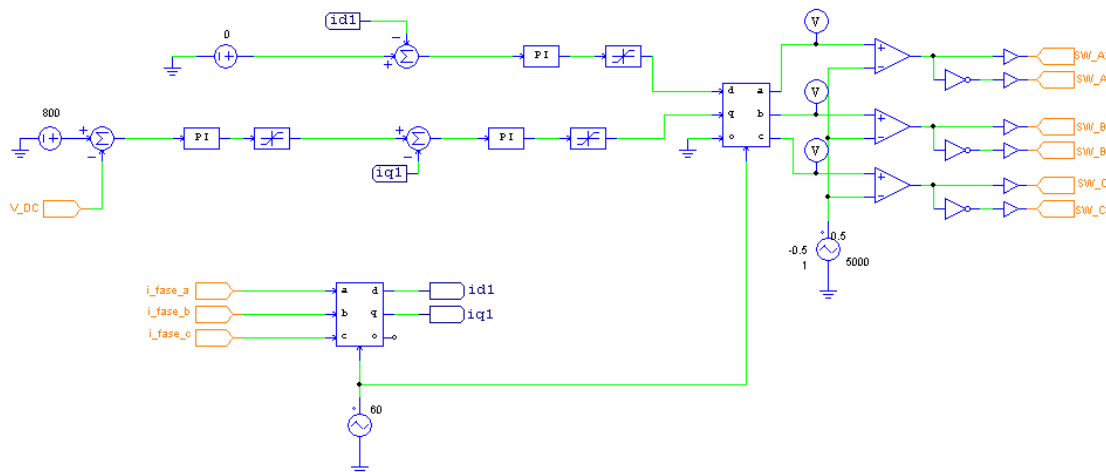


Figura 2.21, Bloque de Control con lazos de Corriente y Tensión implementado en *PSim*®

Para probar el funcionamiento se ha simulado al convertor trabajando a plena potencia con una carga de 50kW, obteniendo los resultados mostrados en la Figura 2.22 donde se observa que el voltaje en la salida del convertor se mantiene a 800V gracias al sistema de control implementado en la sección 2.3.4.

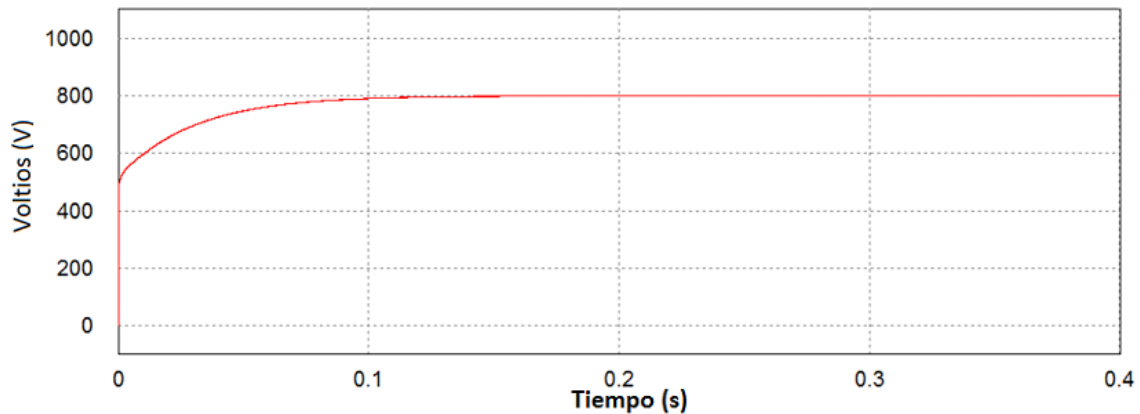


Figura 2.22, Tensión en la Salida del conversor VSI

La corriente en la entrada del conversor se muestra en la Figura 2.23 y tiene una distorsión armónica de 0.7% que cumple con la norma IEEE 519-2014, para este tipo de conversores.

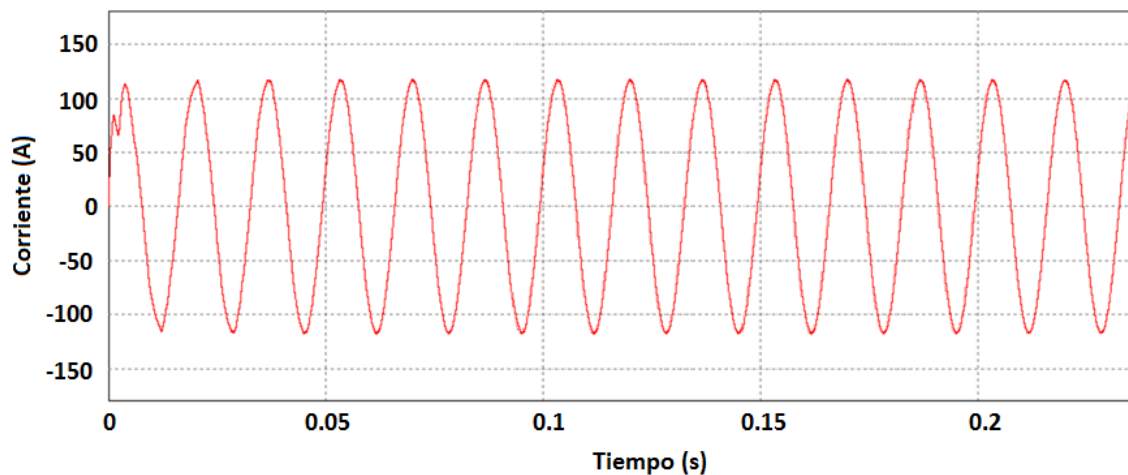


Figura 2.23, Distorsión Armónica de la corriente del VSI

## 2.4 Rectificador tipo VIENNA

El rectificador tipo VIENNA fue introducido en 1996 por W. Kolar en su trabajo sobre el uso de este tipo de rectificador para sistemas trifásicos detallado en [29] y es la simplificación de usar varios rectificadores monofásicos. Una característica importante de este tipo de rectificador es el uso del neutro de la fuente AC, que permite dividir la tensión en la salida, reduciendo el estrés eléctrico al que están sometidos sus diferentes elementos semiconductores.



### 2.4.1 Topología del rectificador tipo VIENNA

La topología de este convertor se muestra en la Figura 2.24, en donde se puede observar que consta de tres interruptores que en este caso IGBTs y seis diodos por cada fase es decir 18 diodos en total.

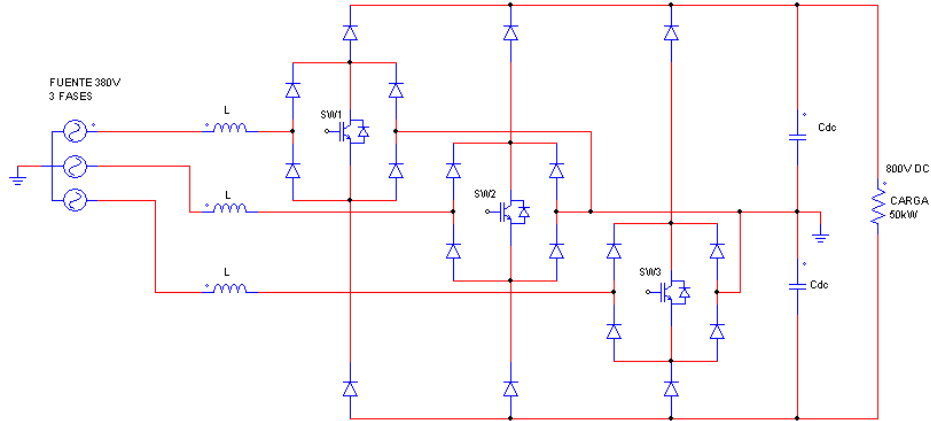


Figura 2.24, Topología rectificador VIENNA

En este tipo de topología se usan diferentes técnicas de control tales como: modelación en espacio de estados o la más común que es el control por histéresis que es el que se va a usar en este estudio.

### 2.4.2 Funcionamiento rectificador tipo VIENNA

Este rectificador activa o desactiva los IGBTs a fin de que la corriente de entrada se mantenga dentro de un rango establecido previamente. De esta manera se logra que el rectificador se comporte como una carga trifásica simétrica balanceada entregando una potencia constante con un valor de voltaje predeterminado. En la Figura 2.25 se muestran los distintos escenarios, en los cuales los números entre paréntesis indican el estado de cada uno de los IGBTs donde "0" representa no conducción y "1" representa conducción. Para más detalles de este funcionamiento se recomienda revisar [29].

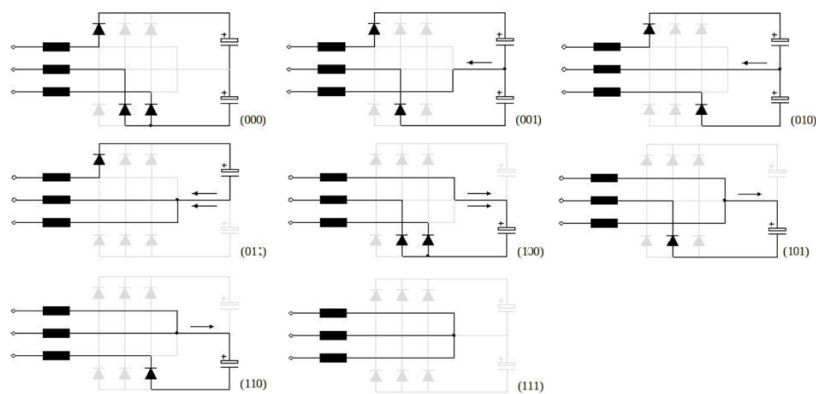


Figura 2.25, Posibles Modos de conducción de un VIENNA

En la Figura 2.25 se muestran los distintos escenarios, en los cuales los números entre paréntesis indican el estado de cada uno de los IGBTs donde “0” representa no conducción y “1” representa conducción. [29]

### 2.4.3 Características del Rectificador tipo VIENNA

El rectificador VIENNA que se implementa en el programa de simulación *PSim*<sup>®</sup>, tiene las características mostradas en la Tabla 4.

Potencia	50kW
Voltaje trifásico de entrada	380 V
Voltaje DC de Salida	800 V

Tabla 4, Parámetros Rectificador VIENNA

### Esquema General

El esquema que se implementa en el simulador se observa en la Figura 2.26, en donde se usan los valores de  $L_1$ ,  $L_2$  y  $C$  calculados en la sección 2.2.3. Los valores para las inductancias asociadas es  $L=50\mu H$  y los capacitores  $C_{dc}=200\mu F$ .

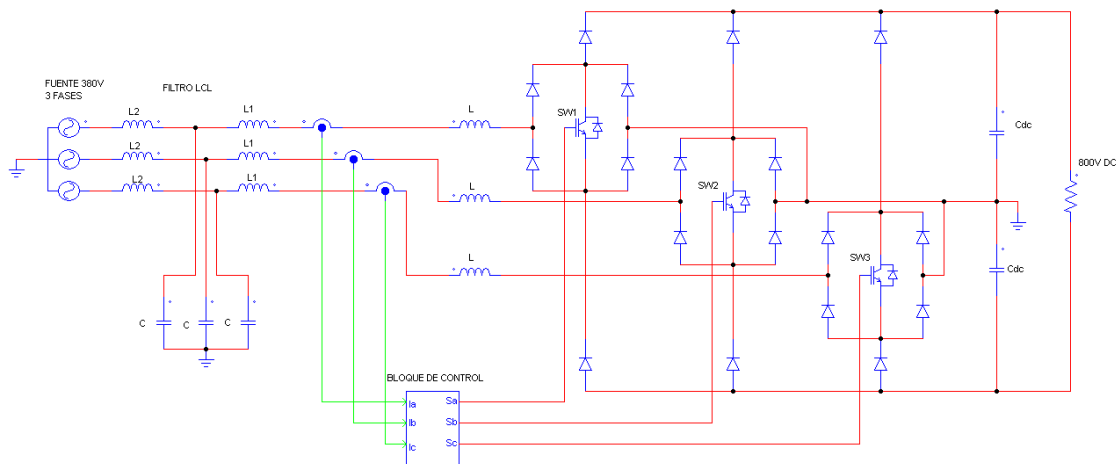


Figura 2.26, Esquema conversor VIENNA

En la Figura 2.26, se observa que el bloque de control es el encargado de controlar los tres IGBTs, el funcionamiento de este bloque se explica a continuación.

### Control del rectificador VIENNA

El control del rectificador VIENNA es muy simple y se denomina de histéresis y como se observa en el diagrama de bloques de la Figura 2.27, este sistema compara la corriente alterna de entrada del inversor con dos corrientes de referencia, una que indica la corriente máxima ( $h+$ ), y otra que indica la corriente

mínima (h-). En función de esto se mantiene inactivo o activado al IGBT de la fase correspondiente pues utiliza este tipo de control de forma independiente para cada fase.

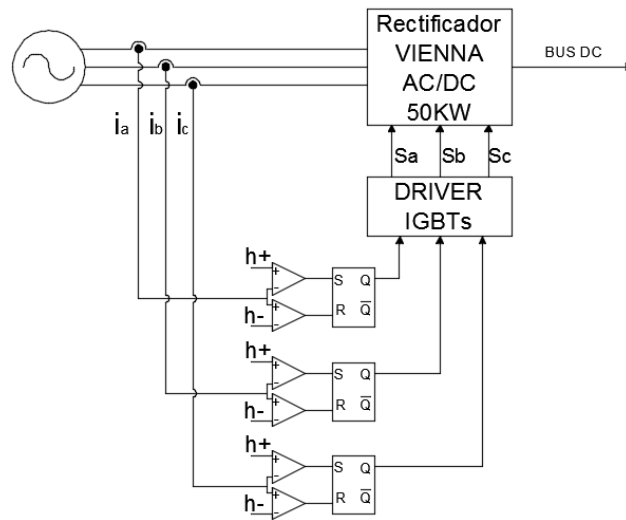


Figura 2.27, Esquema de Control por Histéresis

En este caso y para una potencia de 50kW del rectificador y un voltaje de salida de 800V, se ha estimado que la corriente necesaria en cada fase es de 131.5A, es por ello se ha establecido una banda de  $h^+ = 135A$  y  $h^- = 128A$ .

#### 2.4.4 Resultados de la Implementación en *PSim*® rectificador VIENNA

Tomando en cuenta las consideraciones de las secciones 2.4.1, 2.4.2 y 2.4.3 se ha implementado el modelo de un rectificador tipo VIENNA en el simulador de circuitos de electrónica de potencia *PSim*®. El esquema resultante se puede observar en la Figura 2.28 con su bloque de control correspondiente, mostrado en la Figura 2.29.

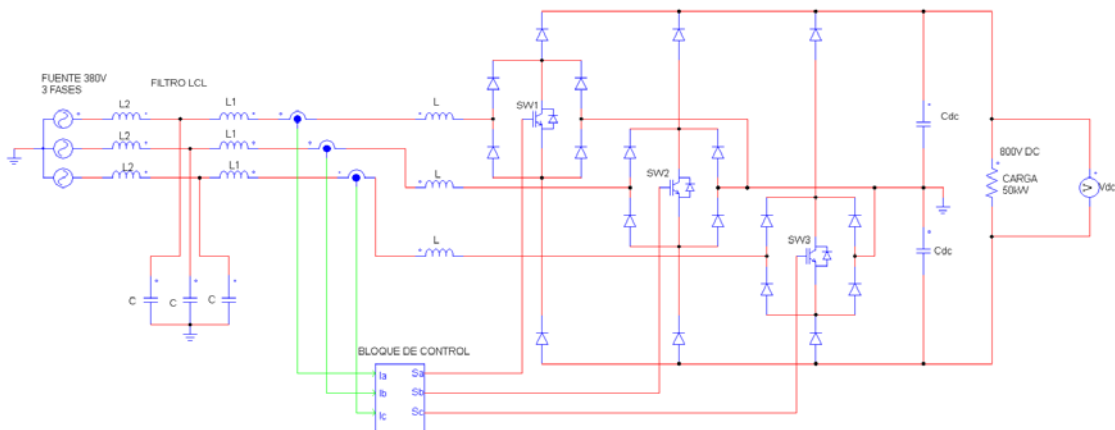


Figura 2.28, Rectificador VIENNA implementado en *PSim*®

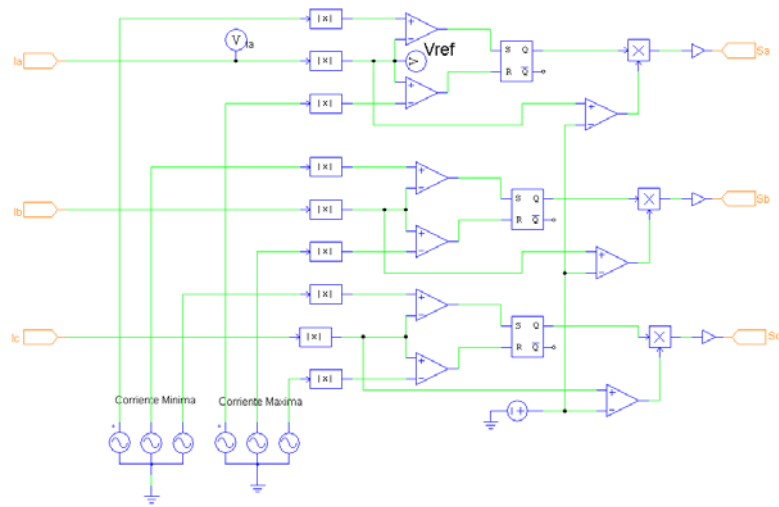


Figura 2.29, Bloque de Control por Histéresis PSim®

Para conocer el comportamiento de este rectificador a plena carga (50kW), se ha obtenido el voltaje en su salida, el cual se observa en la Figura 2.30.

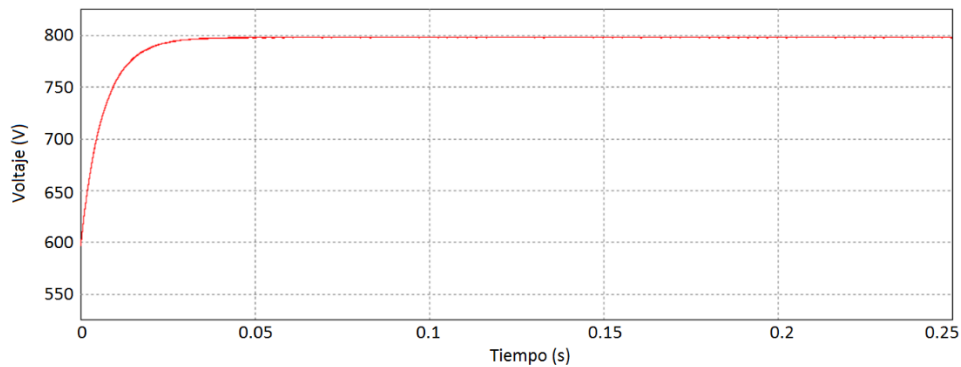


Figura 2.30, Salida DC rectificador tipo VIENNA

La corriente en la entrada del inversor se muestra en la Figura 2.31 y tiene una distorsión armónica de 5.36%, la cual está sobre la distorsión armónica permitida en la norma IEEE 519-2014, razón por la cual no se implementará esta topología para las estaciones de carga.

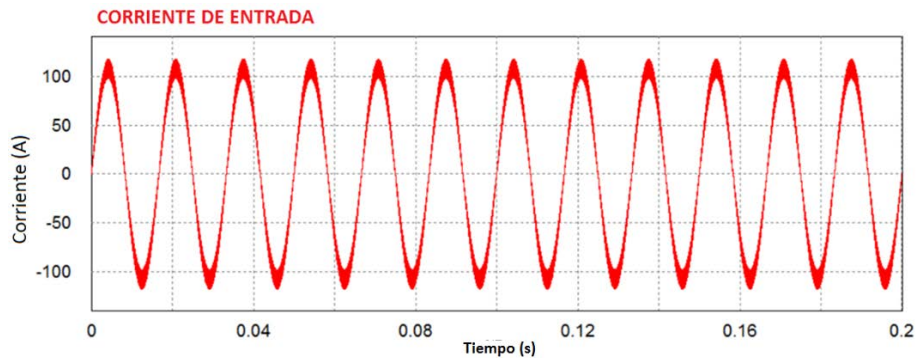


Figura 2.31, Entrada AC rectificador VIENNA

## 2.5 Modelamiento de la batería

Con el reciente auge del mercado de los vehículos eléctricos, y los continuos avances tecnológicos en el desarrollo de baterías con mayor capacidad y densidad energética, no se ha estandarizado ningún tipo de material para la construcción de estas baterías, llevando a que cada marca y modelo de auto eléctrico tengan tipos de baterías diferentes. En la Tabla 5 se tiene una recopilación de los diferentes autos eléctricos del mercado junto con el tipo de batería que utilizan.

Company	Country	Vehicle model	Battery technology
GM	USA	Chevy-Volt	Li-ion
		Saturn Vue Hybrid	NiMH
Ford	USA	Escape, Fusion, MKZ HEV	NiMH
		Escape PHEV	Li-ion
Toyota	Japan	Prius, Lexus	NiMH
Honda	Japan	Civic, Insight	NiMH
Hyundai	South Korea	Sonata	Lithium polymer
Chrysler	USA	Chrysler 200C EV	Li-ion
BMW	Germany	X6	NiMH
		Mini E (2012)	Li-ion
BYD	China	E6	Li-ion
Daimler Benz	Germany	ML450, S400	NiMH
		Smart EV (2010)	Li-ion
Mitsubishi	Japan	iMiEV (2010)	Li-ion
Nissan	Japan	Altima	NiMH
		Leaf EV (2010)	Li-ion
Tesla	USA	Roadster (2009)	Li-ion
Think	Norway	Think EV	Li-ion, Sodium/Metal Chloride

Tabla 5, Tipos de Baterías usados en Vehículos Eléctricos comerciales [30]

Como se observa en la Tabla 5 las tecnologías más usadas en las baterías son la de níquel-metal-hidruro (NiMH) y la de ion de litio (Li-ion), sin embargo, la tendencia del mercado actual se inclina hacia el uso masivo de baterías de Polímero-Litio (Li-Po), tal como es el caso de fabricantes como Hyundai y Kia.

En la Tabla 6 se muestran las distintas tecnologías de baterías usadas en la actualidad, en donde la mayor densidad de energía de almacenamiento y mayor cantidad de recargas es la de Polímero-Litio. Es por esta razón que en este proyecto se modela una batería de vehículo eléctrico con esta tecnología.



Tipo	Energía/ peso	Tensión por elemento (V)	Duración (número de recargas)	Tiempo de carga	Auto-descarga por mes (% del total)
Plomo	30-50 Wh/kg	2 V	1000	8-16h	5 %
Ni-Cd	48-80 Wh/kg	1,25 V	500	10-14h *	30%
Ni-Mh	60-120 Wh/kg	1,25 V	1000	2h-4h *	20 %
Li-ion	110-160 Wh/kg	3,16 V	4000	2h-4h	25 %
Li-Po	100-130 Wh/kg	3,7 V	5000	1h-1,5h	10%
Zinc-aire	140-180 Wh/kg	1.2 V	500		
Celda de combustible	Dado por los estanque de H	1.2 V	NA	Debe agregarse combustible	

Tabla 6, Comparación de tipos de baterías [31]

Según los cálculos realizados en [30], se necesita una potencia de la batería de al menos 61kW para poder acelerar un vehículo de 1360 kg de 0 a 96.6km/h en 10 segundos rompiendo las fuerzas de inercia, viento, rozamiento, etc.

Tomando en cuenta la relación del peso con respecto a la energía almacenada por el vehículo, se ha definido que la mejor capacidad de una batería es de aproximadamente 30kWh, lo que le permitirá recorrer 160 kilómetros aproximadamente a un vehículo eléctrico. [30]

### 2.5.1 Parámetros de la Batería a modelar

Se ha considerado realizar el modelo de la batería con las características de la del Kia Soul Electric, según las especificaciones técnicas de [32] que se resumen en la Tabla 7:

Tipo:	Polímero-Litio
Voltaje Nominal:	360V
Voltaje de cada celda:	3.7V
Máxima Corriente de Carga:	231V
Máximo Voltaje de Carga:	413V
Potencia Usable:	77Ah
Energía Usable:	27kWh

Tabla 7, Parámetros de la batería del Modelo

### 2.5.2 Modelo de Celda Li-Po 3.7V, 11Ah

El modelo de la celda de Li-Po utilizado ha sido presentado en [33], con las características de la Tabla 8, que corresponden a una celda marca Kokam SLBP usada para construir las baterías de vehículos eléctricos.

Parámetro	Valor
Capacidad	11Ah
Voltaje Nominal	3.7V
Voltaje Máximo de Carga	4.2V
Voltaje Limite de Descarga	2.7V
Corriente Máxima de Carga	33A
Corriente Máxima de Descarga	88A
Impedancia Inicial	1.6m $\Omega$
Vida Útil	1400 ciclos

Tabla 8, Parámetros de Celda Polímero -Litio

La Figura 2.32 muestra la curva del voltaje en función de la descarga de la batería con una corriente de descarga de 11A.

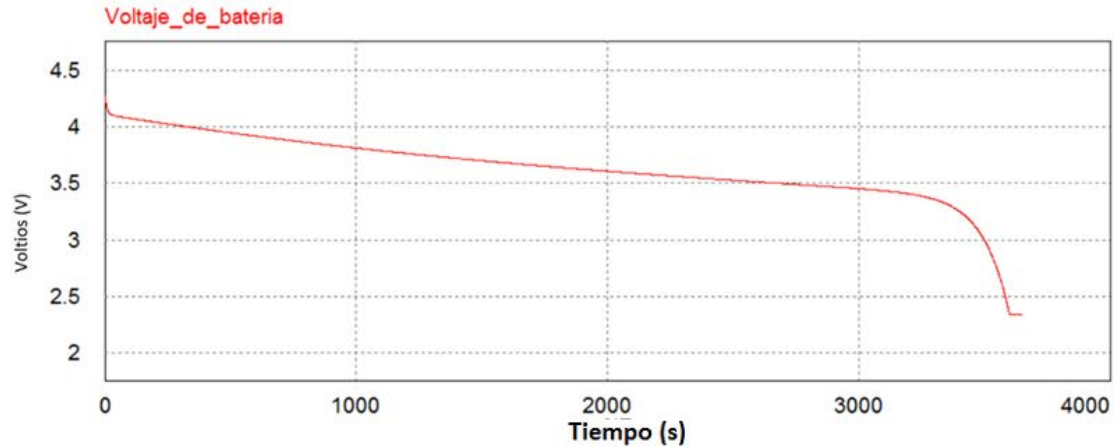


Figura 2.32, Curva de Descarga de la Batería [33]

Para modelar la batería se plantea el circuito de la Figura 2.33 en donde se tiene que los valores de resistencias y capacitores son  $R_t=0.015\Omega$ ,  $R_i=0.0033\Omega$  y  $C_t=555F$ .

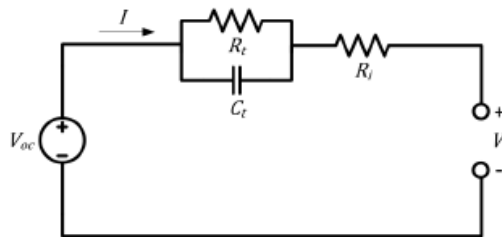


Figura 2.33, Modelo Eléctrico de la Batería [33]

La fuente de voltaje  $V_{oc}$  provee un voltaje variable en función del estado de carga denominado SoC. El SoC se define por la ecuación 14 donde  $C$  es la capacidad de la batería y  $Q_d$  es la carga que ya se ha consumido.

$$SoC = \frac{C - Q_d}{C} \%100 \quad (14)$$

La correspondiente a la fuente de voltaje  $V_{oc}$  se ha obtenido en de manera experimental mediante aproximaciones numéricas, cuyos resultados se reflejan en la ecuación 15 que expresa a  $V_{oc}$  como una ecuación no lineal en función  $SoC$ .

$$V_{oc}(SoC) = -1.035 * e^{-35SoC} + 0.315 * SoC^3 - 0.075 * SoC^2 + 0.495 * SoC + 3.575 \quad (15)$$

### 2.5.3 Implementación de Modelo de Batería en *PSim*<sup>®</sup>

Con el objetivo de simular el comportamiento de una batería de Li-Po del Kia Soul EV en una estación de carga rápida, se la ha implementado en el simulador de circuitos eléctricos y electrónicos de potencia *PSim*<sup>®</sup>.

En la Figura 2.34 se muestra el esquema usado en *PSim*<sup>®</sup> para implementar el modelo de batería Li-Po de 3.7V y 11Ah.

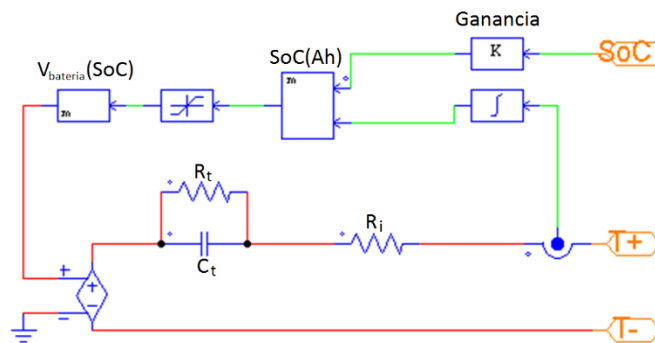


Figura 2.34, Esquema de Celda Li-Po en *PSim*<sup>®</sup>

A partir del modelo de batería de Li-Po se han creado módulos con tensión nominal de 3.7V y 77Ah como se muestra en la Figura 2.35, esto se ha logrado uniendo varias celdas en paralelo.

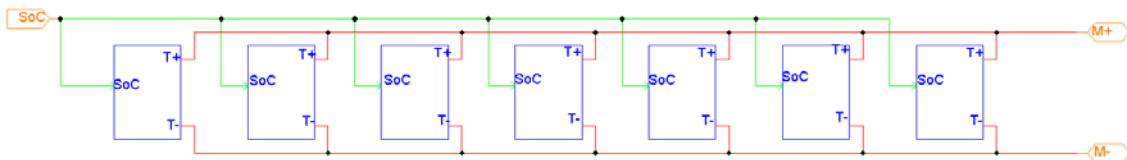


Figura 2.35, Modulo 3.7V 77Ah en *PSim*<sup>®</sup>

Para simular la batería del vehículo eléctrico, se han usado 96 módulos de 3.7V-77Ah en serie, tal como se observa en la Figura 2.39. De esta manera se logra simular una batería de Li-Po de 355.2V-77Ah que proveen una energía nominal de 27.3kWh



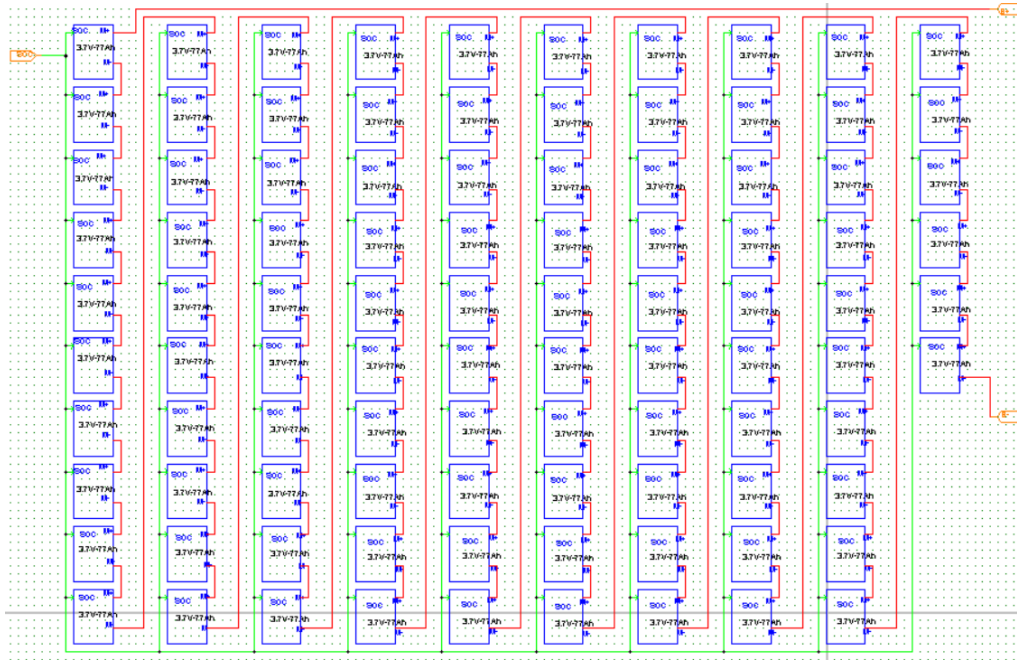


Figura 2.36, Banco de Baterías Li-Po 355.2V-77Ah

Sin embargo y debido a la capacidad de cómputo requerida por *PSim*<sup>®</sup> para simular esta cantidad de celdas, se ha obtenido un circuito equivalente de la Figura 2.37 correspondiente a la batería de 355.2V-77Ah, con  $R_t=0.205728\Omega$ ,  $C_t=40.47F$  y  $R_i=0.45269\Omega$  con su  $V_o$  (SoC) determinado por la ecuación 16

$$V_o(SoC) = 69 * (-1.035 * e^{-35SoC} + 0.315 * SoC^3 - 0.075 * SoC^2 + 0.495 * SoC + 3.575) \quad (16)$$

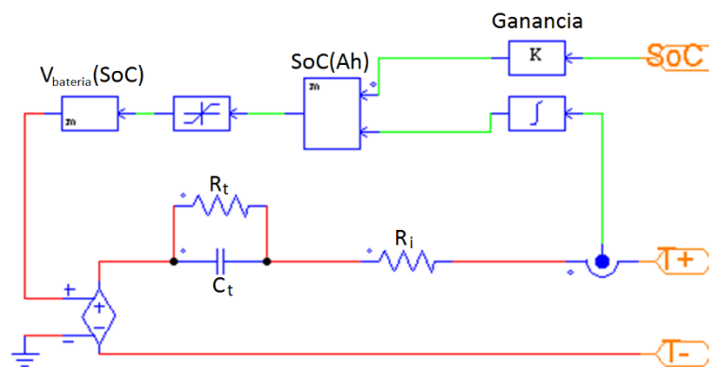


Figura 2.37, Batería Li-Po 355.2V-77Ah Modelo Simplificado

La batería de 255V-77Ah correspondiente a un Kia Soul EV simulada en *PSim*<sup>®</sup> ha sido evaluada con diferentes consumos de potencia correspondiente a diferentes velocidades promedio del Kia Soul EV y también a la potencia máxima del motor resumido en la Tabla 9.

Velocidad (km/h)	Potencia Promedio (W)	Corriente Promedio (A)
16	1269	3.5
32	2750	7.7
64	8052	22.7
80	12165	34.3
120	26647	75
Máxima Potencia del Motor	81000	228

Tabla 9, Potencia en función de la Velocidad

A continuación, se muestran los resultados de la simulación de la batería con las diferentes corrientes de descarga correspondientes a la velocidad promedio a la que el auto eléctrico circulará. La Figura 2.3 muestra la curva de descarga de la batería para velocidades de 16 y 32km/h, la Figura 2.39 lo hace para velocidades de 64 y 80 km/h, la Figura 2.40 muestra la curva de descarga para una velocidad de 120km/h y para cuando se exige la máxima potencia del motor.

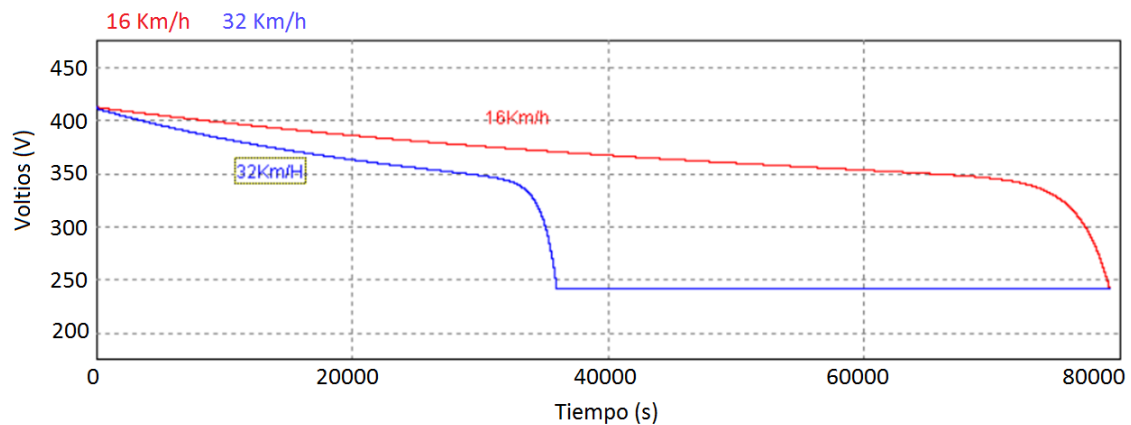


Figura 2.38, Comportamiento del Voltaje de la Batería para velocidad de 16 y 32 Km/h

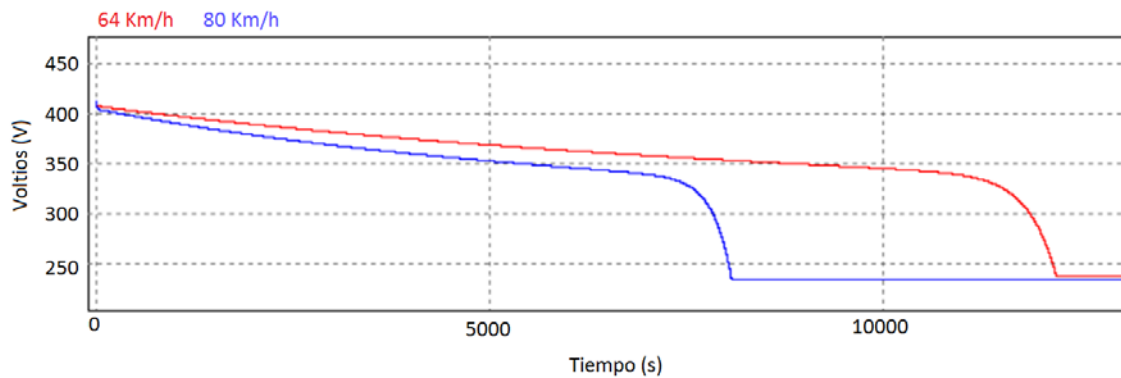


Figura 2.39, Comportamiento del Voltaje de la Batería para velocidad de 64 y 80 Km/h

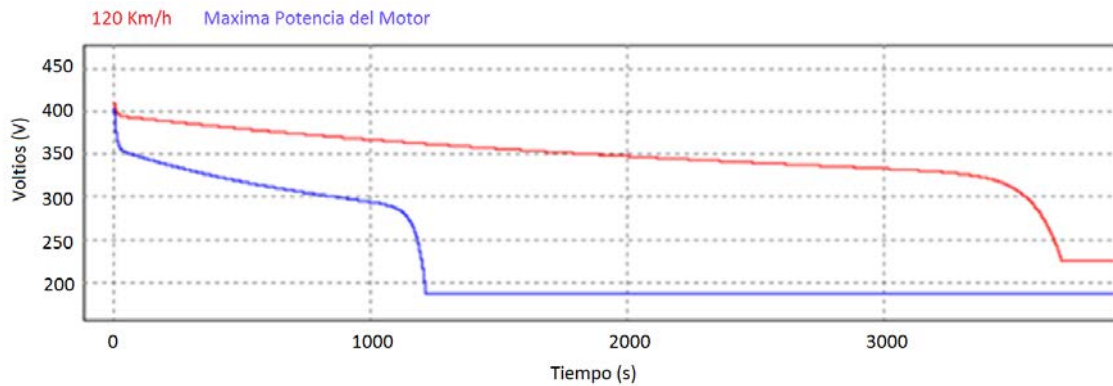


Figura 2.40, Comportamiento del Voltaje de la Batería para velocidad de 120Km/h y a Potencia Máxima del motor

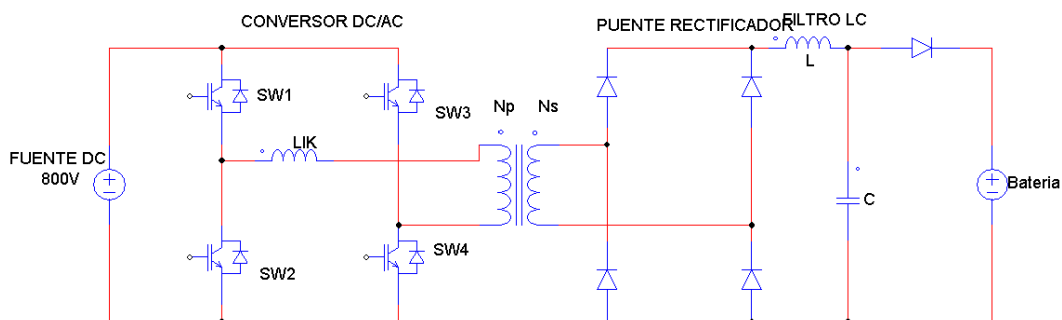
Como se observan en las gráficas anteriores, la batería actúa de diferente manera bajo distintas condiciones de descarga. Esto permite tener un comportamiento muy apegado a la realidad por parte de la estación de carga.

## 2.6 Conversor DC/DC de Puente Completo

Dentro de una estación de carga, los convertidores DC/DC deben estar aislados de la red de distribución eléctrica. Para esto se usa un convertidor DC/AC de puente completo monofásico que se conecta a un transformador de alta frecuencia que permite un aislamiento galvánico y que a su vez está conectado a un puente rectificador de 4 diodos. El diseño de este convertor de basa en [34].

### 2.6.1 Topología Conversor DC/DC de Puente Completo

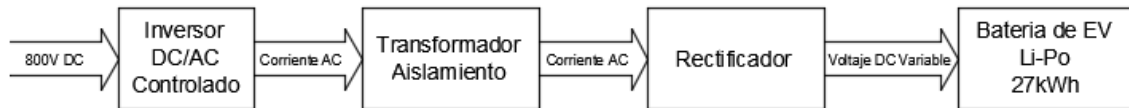
La topología empleada para el convertidor DC/DC de puente completo se muestra en la Figura 2.41 y consta principalmente de un convertidor DC/AC que genera una corriente alterna de alta frecuencia, un transformador de aislamiento de alta frecuencia, un puente rectificador hecho de cuatro diodos que se encarga de convertir la corriente AC en DC nuevamente y un filtro LC que mantiene una tensión y corriente continua en la salida.



*Figura 2.41, Topología Conversor DC/DC Puente Completo*

## 2.6.2 Funcionamiento del Conversor DC/DC de Puente Completo

El conversor DC/DC aislado de puente completo tiene las etapas de funcionamiento mostradas en la Figura 2.42 que a continuación se explica más detenidamente.

*Figura 2.42, Etapas de Funcionamiento Conversor DC/DC Puente Completo*

### Conversor DC/AC

En esta etapa, se utiliza un puente completo de IGBTs a fin de generar corriente alterna a una frecuencia de 25kHz mediante el proceso explicado en [25]. La onda de corriente generada es de tipo cuadrada y permite ser usada en el transformador de alta frecuencia. Además, al controlar el ciclo de trabajo de la onda de corriente alterna, se podrá controlar el voltaje al que se va a cargar la batería.

### Transformador de Aislamiento

Este es un transformador de alta frecuencia que se encarga de aislar galvánicamente a la batería de vehículo eléctrico del resto de sistema de alimentación eléctrica. Además, se usa la relación de los devanados del transformador para limitar el voltaje que podrá tener el cargador de baterías.

### Puente rectificador

Este es un puente conformado por 4 diodos que se encargan de rectificar la corriente alterna que reciben de parte del inversor.

### Filtro LC

Este filtro se encarga de eliminar la corriente de rizado en la salida del conversor y absorber el ruido generado por la conmutación de los IGBTs.

### 2.6.3 Diseño del convertor aislado DC/DC de Puente Completo

Para implementar el convertor DC/DC aislado de puente completo se ha definido que debe tener las características presentadas en la Tabla 10.

Potencia	50kW
Frecuencia de Conmutación	25kHz
Voltaje DC de Entrada	800 V
Voltaje DC de Salida	200-500 V
Corriente de Salida	0-125 A

Tabla 10, Características del Convertor DC/DC Puente completo

A partir de las características planteadas, se han tomado diversas consideraciones y cálculos para definir las características de los elementos que conforman el convertor DC/DC.

#### Esquema General

El esquema usado para esta simulación se puede observar en la Figura 2.43, los diferentes elementos se calcularon y diseñaron como se muestra a continuación.

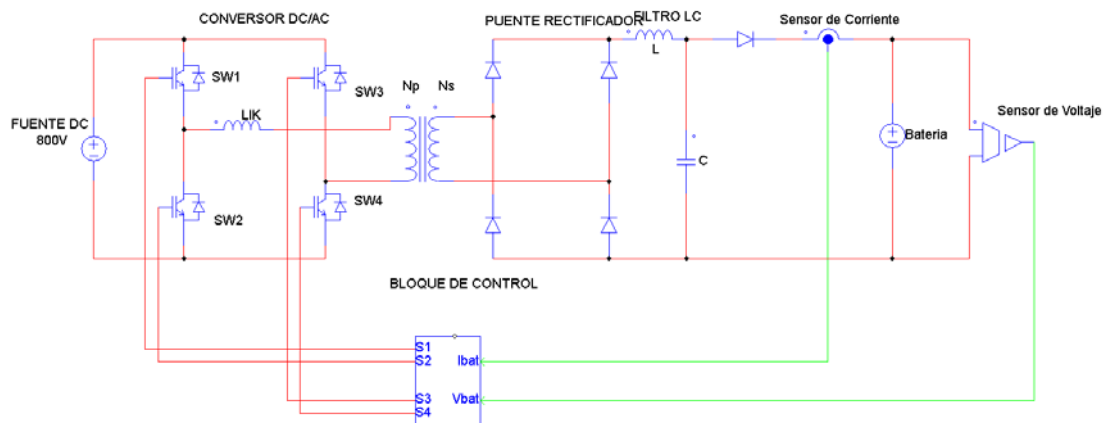


Figura 2.43, Convertor DC/DC Puente Completo PSim®

#### Relación de Transformación

El transformador es muy importante en el diseño de este tipo de convertor, pues se encarga de aislar galvánicamente a la batería de la red eléctrica. Además, es un transformador diseñado para funcionar a altas frecuencias.

Para dimensionar la relación de transformación se emplea la ecuación 17 tomada de [34], en donde el valor del ciclo de trabajo de la onda es  $0.8 < D_{eff} < 0.9$ , por esta razón se ha decidido usar  $D_{eff} = 0.85$ .

$$V_{out} = V_{dc} * N * D_{eff} \quad (17)_1$$



En este caso la relación de transformación viene dada por “N” y tomado en cuenta el estándar IEE2030, el voltaje en la salida puede estar comprendido entre 50 y 500 V, por lo tanto, la relación de transformación se ha dimensionado tomando en cuenta la entrada DC de 800V y un voltaje de salida de 450V. Con los parámetros anteriores en consideración junto con la ecuación 17, se ha determinado que se requiere  $N=0.6617$  que en fracción es  $N=33/50$ .

Tomando en consideración el diseño de un transformador de alta frecuencia empleado en [34] se tiene que la ecuación 18 presenta la relación del número de espiras del devanado primario tomando en cuenta las características del núcleo.

$$N_p = \frac{V_{dc} * (D_{eff}/2)}{2 * A_{fe} * B_{max} * f_{sw}} \quad (18)$$

Donde los valores corresponden a un núcleo VITROPERM 500F mostrado [35]. Que tiene un área de  $4.75\text{cm}^2$ , la densidad de flujo magnético es  $B_{max}=1.1\text{T}$  que está limitado a un 30%, lo que corresponde a  $B_{max}=0.4\text{T}$ . La sección equivalente corresponde a dos núcleos, por lo tanto,  $A_{fe}=9.5\text{cm}^2$  con una frecuencia de conmutación  $F_{sw}=25\text{kHz}$ . Con estos parámetros se obtiene que el devanado primario es  $N_p=17.89$  que se redondea a  $N_p=18$  vueltas y con la consideración anterior de la relación de transformación de  $N=0.6617$ , se tiene un valor aproximado de  $N_s=12$  espiras.

Con estas consideraciones se tiene que el nuevo valor de relación de transformación es  $N=12/18=0.66$ .

#### Inductancia de Fuga del Transformador

Para este cálculo se emplea la ecuación 19 tomada de [34]:

$$L_{lk} = \frac{N * V_{dc} * (1 - D_{eff})}{4 * I_{out} * f_{sw}} \quad (19)$$

Al reemplazar los valores correspondientes en la ecuación 16 con  $D_{eff}$  entre 0.8 y 0.9 se tiene que la inductancia de fuga está en el rango:

$$2.6\mu\text{H} < L_{lk} < 5.2\mu\text{H}$$

Debido al pequeño valor de  $L_{lk}$  no es necesario incluirla el modelo del transformador.

#### Inductor de Salida

Para dimensionar la inductancia en la salida se toma la peor condición para la corriente de rizado posible, que es cuando el convertidor entrega 125A que corresponde a un ciclo de operación de 0.95. También se tiene que  $\Delta I$  es el doble de la corriente.



$$\Delta V = 800 * \frac{12}{18} * D_{eff} - 200 = 306V$$

$$\Delta I = 2 * I_{out} = 250A$$

$$\Delta t = \frac{D_{eff}}{2 * f_{sw}} = 19\mu S$$

Esto junto a la ecuación 20 genera un valor de 23.3μH para el inductor.

$$L > \Delta V * \frac{\Delta t}{\Delta I} \quad (20)$$

#### Condensador de Salida

El dimensionamiento del capacitor de salida se realiza mediante la ecuación 21, bajo los mismos parámetros que para el dimensionamiento del inductor.

$$\Delta V_c < \frac{\Delta t * \frac{\Delta I}{2}}{C} \quad (21)$$

Con el fin de obtener el menor voltaje de rizado posible en la salida a plena carga del conversor se ha fijado un voltaje de rizo de:

$$\Delta V_c = 500 * 0.5\% = 2.5V$$

Con  $\Delta t = 1/(4 * f_{sw})$  se tiene el siguiente valor del condensador:

$$C > 500\mu F$$

Con estas consideraciones, se ha visto necesario implementar un capacitor de  $C=1000\mu F$ .

#### 2.6.4 Diseño del Control del Conversor DC/DC de Puente Completo

Para realizar el control del conversor DC/DC de puente completo se ha optado por implementar un control de desplazamiento de cruce por cero para controlar los IGBTs, además se han definido dos etapas fundamentales para la carga de un vehículo eléctrico en una estación de carga rápida, la primera etapa se denomina carga con corriente constante y la otra etapa se denomina carga con voltaje constante.

La carga con corriente constante inyecta energía a la batería con un amperaje predeterminado siempre que la batería no supere el 80% de su estado de carga nominal, siendo este método de carga el que menos tiempo emplea. En este caso se ha establecido que la corriente de carga será de 125A.

Cuando la batería tiene un estado de carga mayor al 80%, se mantiene un voltaje constante en la salida del conversor DC/DC, este proceso es mucho más lento

que el método de carga mediante corriente constante. En este caso se ha empleado el voltaje máximo de carga de la batería del KIA SOUL mostrado en que es de 413V.

Control para carga con corriente constante.

Para este caso se ha determinado la función de transferencia de corriente del inductor L de la salida del conversor en función del ciclo de trabajo “d” que se muestra en la ecuación 22.

$$\frac{i_L}{d} = \frac{V_{dc} * N}{sL + Z_{eqv}} \quad (22)$$

Donde  $Z_{eqv}$  está representado por:

$$Z_{eqv} = \frac{\left(R_c + \frac{1}{sC}\right) * \left(R_i + \frac{R_t}{sR_t C_t + 1}\right)}{\left(R_c + \frac{1}{sC}\right) + \left(R_i + \frac{R_t}{sR_t C_t + 1}\right)}$$

Donde:

$V_{dc}$  es el voltaje de entrada del conversor de 800V.

$R_c$  es la resistencia asociada al capacitor de 15mΩ.

$R_t$  es la resistencia equivalente de la batería de 0.205Ω de la sección 2.5

$C_t$  es el capacitor equivalente de la batería de 40.47F.

$R_i$  es la resistencia serie asociada a la batería de 0.452Ω.

C es el capacitor de la salida del conversor de 10mF

L es la inductancia en la salida del conversor de 20μH

El control empleado es de tipo PI con una función de transferencia  $G_i = k_p + \frac{k_i}{s}$ .

La ganancia es  $\beta_i=1$ . Y el diagrama de bloques se muestra en la Figura 2.44 representado con la ecuación 23.

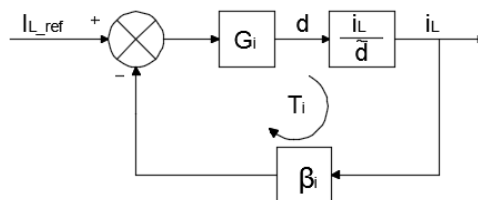


Figura 2.44, Control de Corriente Conversor DC/DC Puente Completo

$$T_i = \beta_i * G_i * \frac{i_L}{d} \quad (23)$$



Para sintonizar el control de carga por corriente se ha empleado el criterio de ajustar la frecuencia de corte a un valor menor a la mitad de la frecuencia de conmutación que es de 25kHz, en este caso se ha escogido 10kHz.

Para el diseño del controlador, se ha usado MatLab, en donde se tiene que los valores de  $K_p=0.0019897$  y  $K_i=4.4$ , según lo mostrado en la Figura 2.45

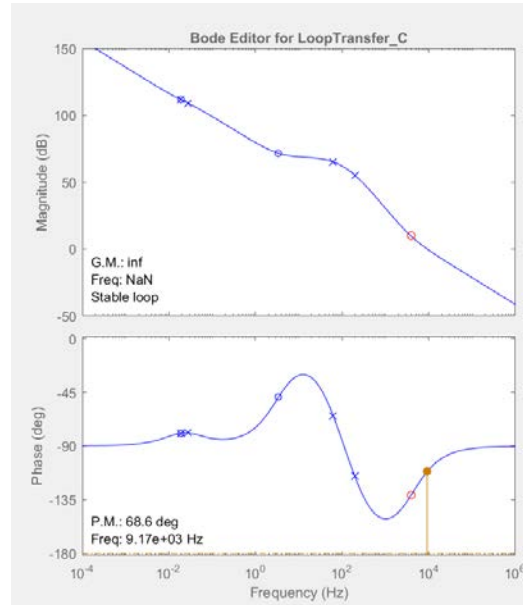


Figura 2.45, Diagrama de Bode Control de Corriente Conversor DC/DC Puente Completo

Control para carga con voltaje constante.

Este tipo de carga se realiza con un voltaje constante de 413V cuando la batería ha rebasado el 80% de su carga nominal. Para esto se lo integra mediante el diagrama de bloque de la Figura 2.46 que a su vez se relaciona con la ecuación 24 que representa el voltaje en función de la corriente que circula por L. En este caso se usa el  $Z_{eqv}$  implementado en el control de carga por corriente.

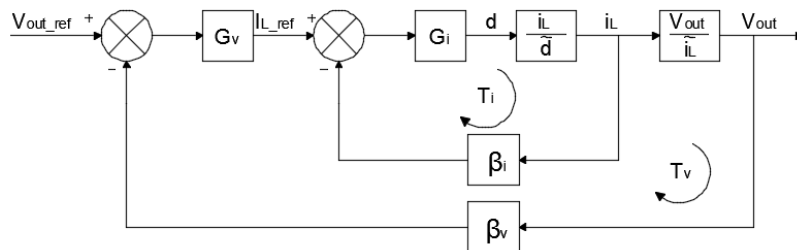


Figura 2.46, Control de Corriente Conversor DC/DC Puente Completo

$$\frac{V_{out}}{i_L} = Z_{eqv} \quad (24)$$

La ganancia es  $\beta_v=1$  y se sintonizo gracias MatLab con el diagrama de Bode presentado en la Figura 2.47 de donde se obtuvo  $K_p=2.2473$  y  $K_i=2588.8$

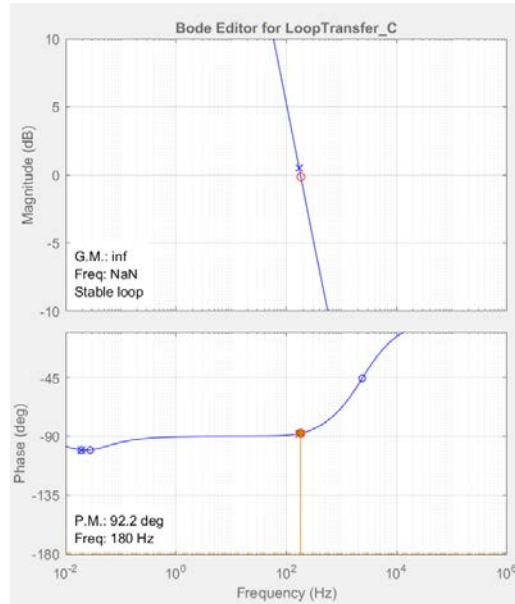


Figura 2.47, Diagrama de Bode Control de Voltaje Conversor DC/DC Puente Completo

### Discretización de los Controladores

A fin de tener un buen control de la carga de batería tanto para corriente constante como con voltaje constante, se ha empleado MatLab para discretizar los controladores PI calculados anteriormente e implementarlos en un controlador discreto con una frecuencia de 20kHz. A continuación, se muestran las ecuaciones resultantes de control de la salida tanto para el control de corriente como para el control de voltaje.

Controlador de Corriente Constante:

$$G_c = \frac{0.00209 Z - 0.00187}{Z - 1}$$

Controlador de Voltaje Constante:

$$G_c = \frac{2.312 Z - 2.183}{Z - 1}$$

### 2.6.5 Resultados de la Implementación en PSim®

Tomando en cuenta los diferentes esquemas de control, topologías, etc. diseñados en los puntos anteriores, se ha implementado el conversor DC/DC de puente completo en el simulador de circuitos de electrónica de potencia PSim®, En la figura 2.48 se puede observar la corriente de carga que se inyecta a la batería, es importante notar que la corriente de carga es constante a 125A hasta que la batería alcanza aproximadamente el 80% de carga de la batería como se

observa en la primera gráfica de corriente, luego el voltaje se mantiene constante como se puede ver en la segunda gráfica de la figura 2.48.

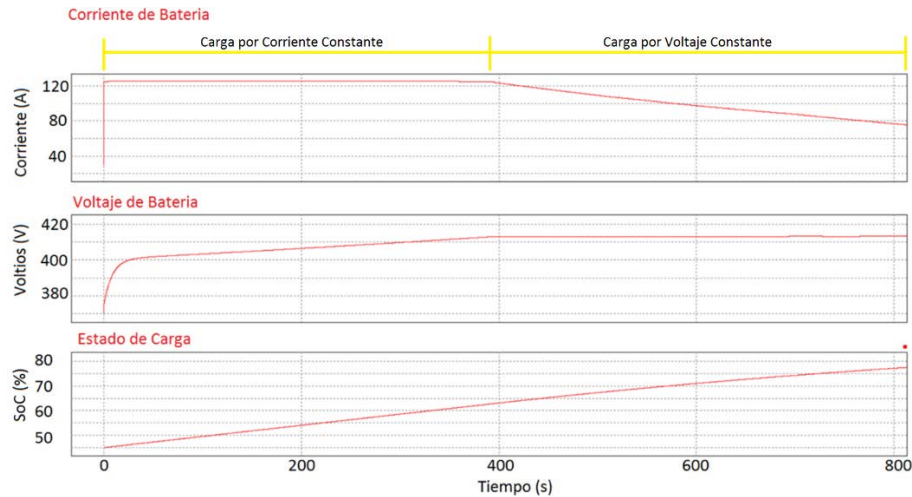


Figura 2.48, Curva de Carga de Batería Con Conversor DC/DC de Puente Completo

## 2.7 Conversor DC/DC Aislado de Medio Puente

Al igual que el conversor DC/DC de puente completo mostrado en la sección 2.5, este conversor está aislado del resto de la red eléctrica mediante un transformador de alta frecuencia. Lo que lo diferencia del conversor de puente completo es una relación de transformación mayor, debido a que el voltaje se divide a la mitad y se requiere un transformador con toma central en el devanado secundario.

### 2.7.1 Topología Conversor DC/DC de Medio Puente

La topología empleada para este conversor se muestra en la Figura 2.49 y consta de un conversor de medio puente DC/AC que genera una corriente alterna a 25kHz, un transformador de alta frecuencia de aislamiento con devanado secundario con toma central, un medio puente rectificador de diodos que se encarga de convertir la corriente alterna en continua y un filtro LC.

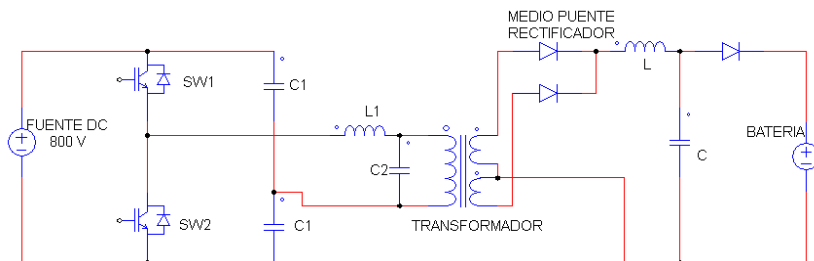


Figura 2.49, Topología Conversor DC/DC Medio Puente

### 2.7.2 Funcionamiento del Conversor DC/DC de Medio Puente

El conversor DC/DC aislado de medio puente tiene las etapas de funcionamiento mostradas en la Figura 2.50 que a continuación se explica más detenidamente.

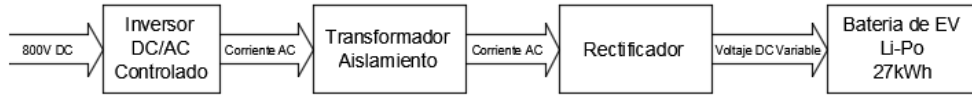


Figura 2.50, Etapas de Funcionamiento Conversor DC/DC Medio Puente

El funcionamiento del conversor DC/DC de medio puente es muy similar al del conversor de puente completo mostrado en la sección 2.5.2, lo único que varía significativamente es que la conversión DC/AC se realiza con dos IGBTs en vez de cuatro, esto hace que el voltaje se divida para dos.

Para compensar la disminución de voltaje por la conversión DC/AC, se ha cambiado la relación de transformación al doble.

### 2.7.3 Diseño del conversor asilado de Medio Puente

Para implementar el conversor DC/DC aislado de medio puente se ha definido que debe tener las características presentadas en la Tabla 11.

Potencia	50kW
Frecuencia de Conmutación	25kHz
Voltaje DC de Entrada	800 V
Voltaje DC de Salida	200-500 V
Corriente de Salida	0-125 A

Tabla 11, Características del Conversor DC/DC Medio Puente

A partir de las características planteadas, se han tomado diversas consideraciones y cálculos para definir las características de los elementos que conforman el conversor DC/DC.

### Esquema General

El esquema usado para esta simulación se puede observar en la Figura 2.51, los diferentes elementos se calcularon y diseñaron como se muestra a continuación.

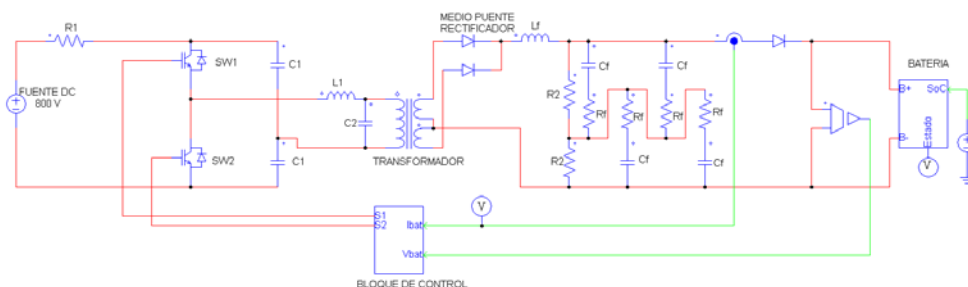


Figura 2.51, Esquema Conversor DC/DC Medio Puente PSim®



### Relación de transformación

El cálculo de la relación de transformación es muy similar al empleado para el convertidor de puente completo. Sin embargo, al ser un inversor de medio puente, implica que el voltaje  $V_{dc}$  de entra se divide para dos, para compensar este hecho se duplica la cantidad de espiras en cada devanado secundario, por lo tanto, se tiene que  $N_p=9$  y cada  $N_s=12$ . Manteniendo la relación de transformación de  $N=1.33$ .

### Inductancia de Magnetización

La inductancia del transformador es la misma que el caso del convertidor de puente completo, por lo tanto, se emplea un valor entre  $0.08H$ .

### Capacitores del Divisor de Tensión

Los capacitores  $C_1$  que forma el divisor de tensión tienen un valor de  $470\mu F$  y se conectan al neutro del devanado primario del transformador.

### Inductor de Resonancia

El inductor de resonancia  $L_1$  tiene un valor de  $3\mu H$  y se conecta en serie al devanado primario del transformador de alta frecuencia.

### Capacitor de Resonancia

El capacitor de resonancia  $C_2$  tiene un valor de  $50pF$  y se conecta en paralelo a la entrada del devanado primario del transformador de alta frecuencia.

### Inductor de Salida

El inductor de salida  $L_f$  tiene un valor de  $20\mu H$  y evita que se generen cambios bruscos en la corriente que se envía a la batería.

### Condensador de Salida

El condensador de salida se ha modelado como un arreglo de capacitores ideales  $C_f$  con valor de  $10000\mu F$  con una resistencia asociada  $R_f$  de  $0.015\Omega$  conectados a dos resistencias  $R_2$  de  $27k\Omega$ .

## 2.7.4 Control del Convertidor DC/DC de Medio Puente

Tal como en el caso del convertidor de puente completo, se usa un control de corriente constante de 125 A. hasta que la batería alcance aproximadamente el

80% de su carga nominal, para luego establecer un lazo de control de voltaje constante que debido a las características de la batería será de 413V.

La diferencia principal con el convertor de puente completo es que el control de los IGBTs será por medio de modulación de ancho de pulso PWM con una frecuencia de 25kHz.

Se usa un control de tipo discreto a una frecuencia de 20kHz con las siguientes ecuaciones:

Controlador de Corriente Constante

$$G_c = \frac{0.002286 Z - 0.002068}{Z - 1}$$

Controlador de Voltaje Constante:

$$G_c = \frac{5.857 Z - 5.143}{Z - 1}$$

### 2.7.5 Resultados de la Implementación en *PSim*<sup>®</sup>

Tomando en cuenta los diferentes esquemas de control, topologías, etc. diseñados en los puntos anteriores, se ha implementado el convertor DC/DC de medio puente en el simulador de circuitos de electrónica de potencia *PSim*<sup>®</sup>. En la simulación se puede observar la corriente de carga que se inyecta a la batería, es importante notar que la corriente es constante a 125A hasta que la batería alcanza aproximadamente el 80% de carga de la batería que es cuando se empieza a tener un voltaje constante.

Esto se puede observar en la Figura 2.52 donde en la primera gráfica se tiene el voltaje de carga de la batería, en la segunda gráfica la corriente y en la tercera el estado de carga de la batería.

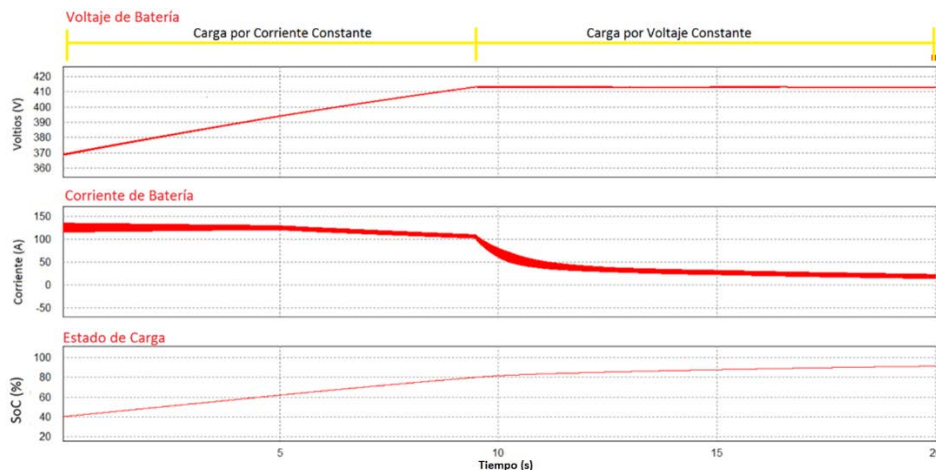


Figura 2.52, Curva de Carga de Batería Con Convertor DC/DC de Medio Puente

## 2.8 Resultados de la implementación de cuatro topologías de estaciones de carga rápida.

En esta sección se muestra los resultados de las simulaciones para las diferentes topologías de estaciones de carga rápida diseñadas en las secciones anteriores.

El objetivo de estas simulaciones es modelar el comportamiento que las diferentes topologías tendrán desde el punto de vista eléctrico, es decir conocer la potencia activa, reactiva y principalmente los armónicos que generan. Todo esto para implementar un modelo general de estación de carga rápida dentro de una red de distribución eléctrica, en el Capítulo 3.

En este caso es importante notar que las topologías que incluyen al rectificador VIENNA no se las ha considerado debido a que la distorsión armónica que genera este rectificador es de 5.36% y excede el valor recomendado en la norma IEEE 519-2014 para armónicos.

### 2.8.1 Rectificador VSI-Convertor de Puente Completo

Esta topología utiliza un rectificador trifásico de tipo VSI analizado en la sección 2.3 de este capítulo, que alimenta al convertor DC/DC de puente completo analizado en la sección 2.6 de este capítulo para cargar la batería de un Kia Soul modelada en la sección 2.5 con una potencia de aproximadamente 50kW. Esta topología se ha implementado en el simulador *PSim*<sup>®</sup> como muestra la Figura 2.53.

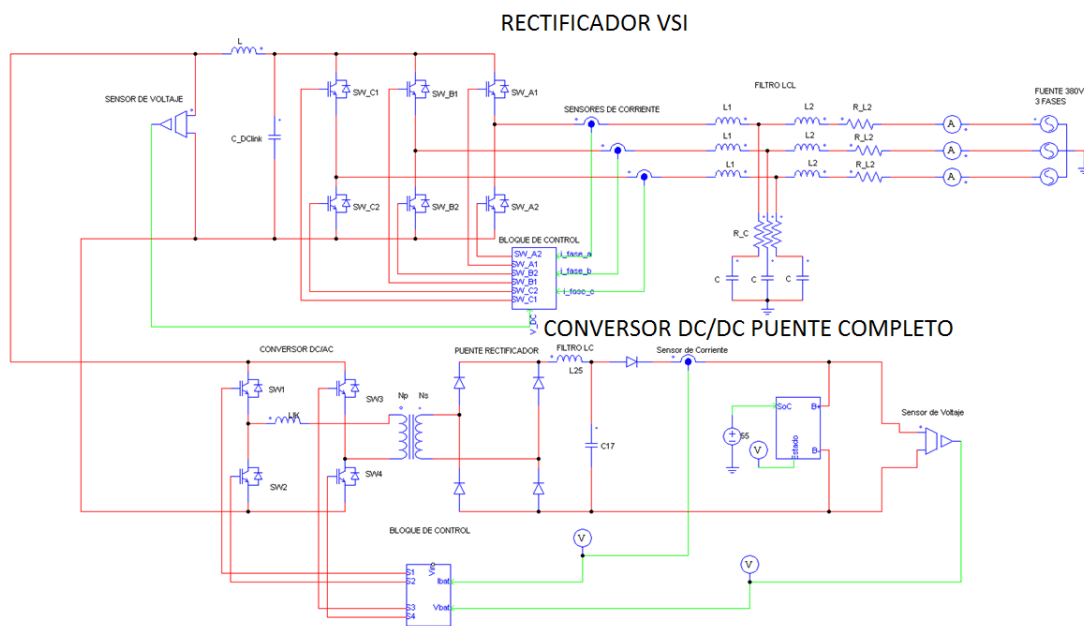


Figura 2.53, Topología Rectificador VSI-Convertor Puente Completo



Los resultados de la simulación mostrada en la Figura 2.54 muestran en rojo la corriente alterna que consume la estación de carga rápida, la cual varía dependiendo del estado de carga de la batería y de si la carga es por corriente constante o por voltaje constante.

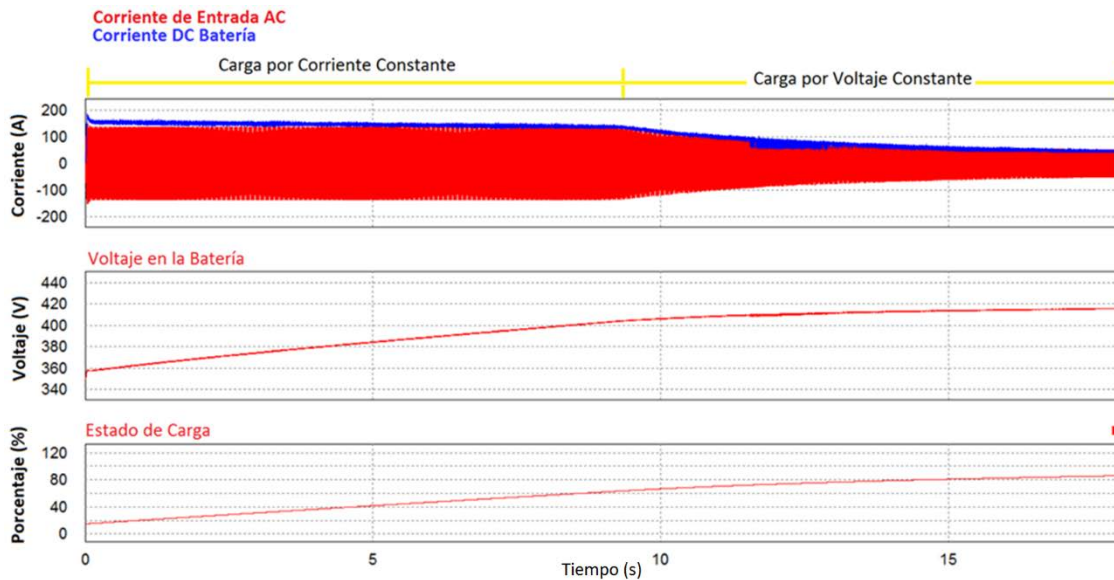


Figura 2.54, Comportamiento Topología Rectificador VSI-Convertor de Puente Completo

Para este caso de estudio lo que nos interesa es el comportamiento de la estación de carga rápida durante la etapa de carga por corriente constante, es por ello que se va a analizar la corriente alterna que absorbe la estación de carga, esto se puede observar en la Figura 2.55 y los datos obtenidos se resumen en la tabla 12.

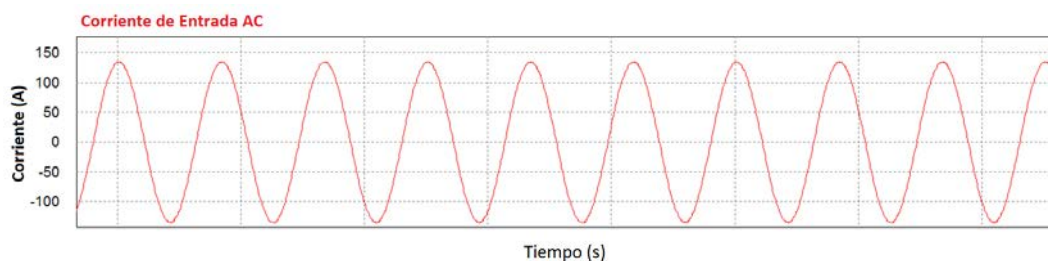


Figura 2.55, Corriente de Entrada Topología Rectificador VSI-Convertor de Puente Completo

Descripción	Valor
Corriente Máxima	135.2A
Corriente RMS	95.4A
Distorsión Armónica (THD)	0.904%

Tabla 12, Parámetros de la Topología Rectificador VSI-Convertor de Puente Completo

Los armónicos más significativos de esta topología se presentan en la Figura 2.56 y se resumen en la Tabla 13. Se puede notar que los armónicos son impares



y el quinto armónico presenta el mayor valor con 0.49 A, seguido por el séptimo armónico con 0.54A.

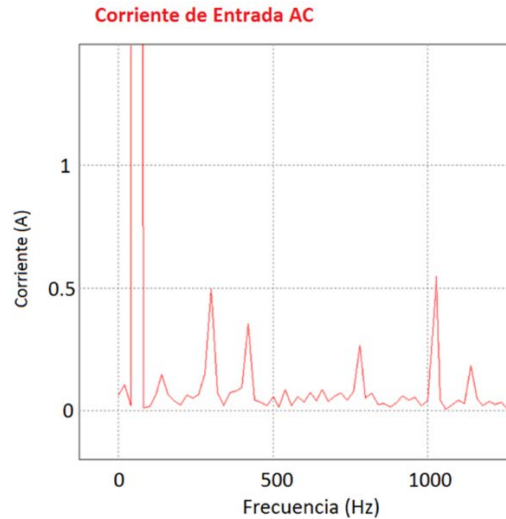


Figura 2.56, Armónicos generados por la Topología Rectificador VSI-Convertor de Puente Completo

Numero de Armónico	Frecuencia (Hz)	Amplitud (A)
1	60	117
5	300	0.49
7	420	0.353
13	780	0.26
17	1020	0.54

Tabla 13, Armónicos de la Topología Rectificador VSI-Convertor de Puente Completo

### 2.8.2 Rectificador VSI-Convertor de Medio Puente

Esta topología utiliza un rectificador trifásico de tipo VSI analizado en la sección 2.3 de este capítulo, que alimenta al convertor DC/DC de medio puente analizado en la sección 2.7 de este capítulo para cargar la batería de un Kia Soul modelada en la sección 2.5 con una potencia de aproximadamente 50kW. Esta topología se ha implementado en el simulador *PSim*<sup>®</sup> como muestra la Figura 2.57.

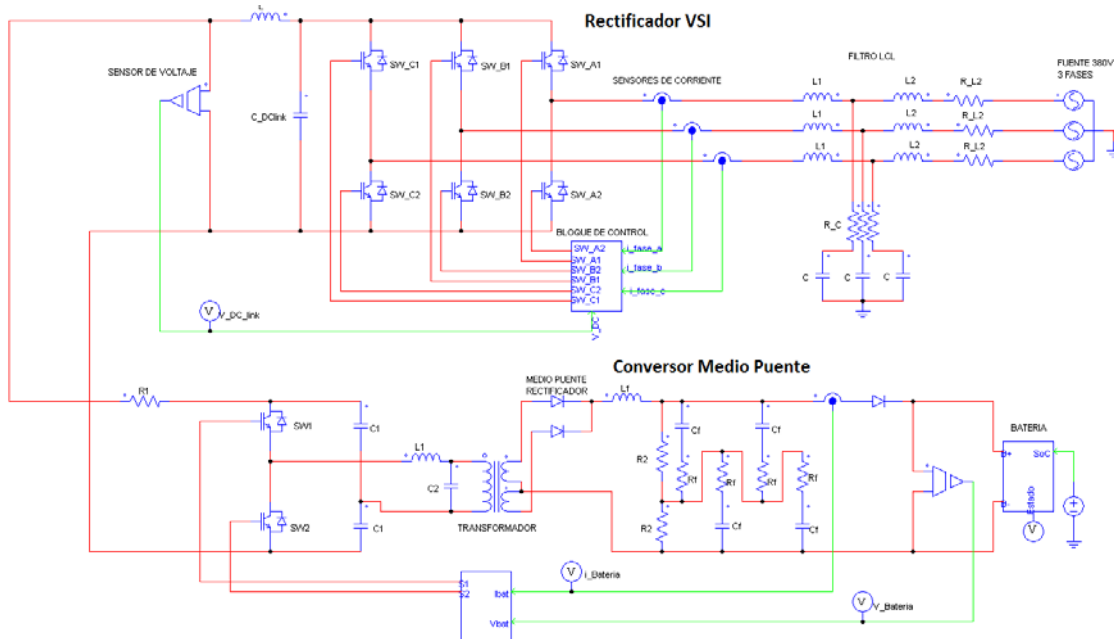


Figura 2.57, Topología Rectificador VSI-Convertor Medio Puente

Los resultados de la simulación mostrada en la Figura 2.58 muestran en azul la corriente alterna que consume la estación de carga rápida, la cual varía dependiendo del estado de carga de la batería.

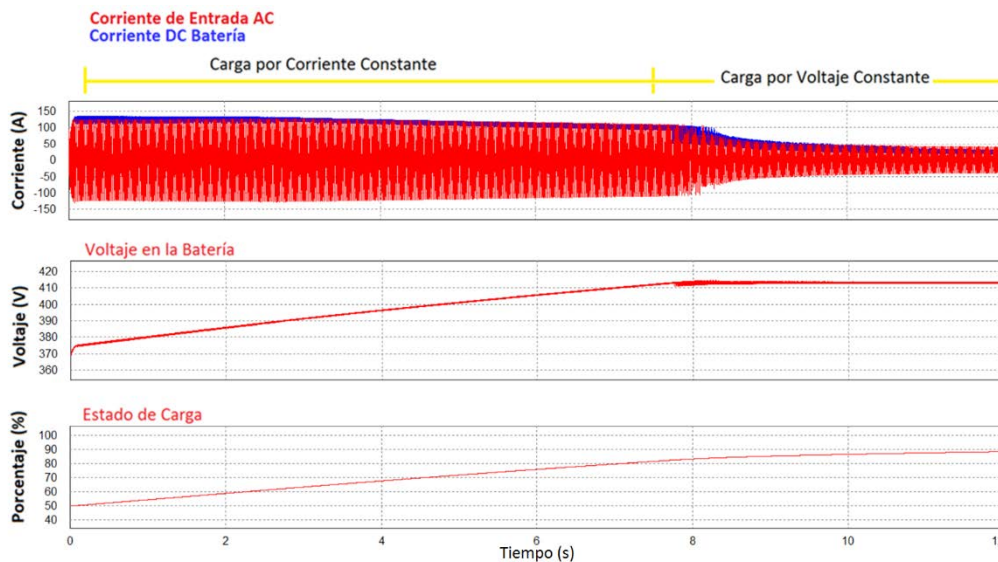


Figura 2.58, Comportamiento Topología Rectificador VSI-Convertor de Medio Puente

Para este caso de estudio lo que interesa es el comportamiento de la estación de carga rápida durante la etapa de carga por corriente constante, es por ello que se va a analizar la corriente alterna que absorbe la estación de carga, esto se puede observar los datos obtenidos en resumen en la tabla 14.

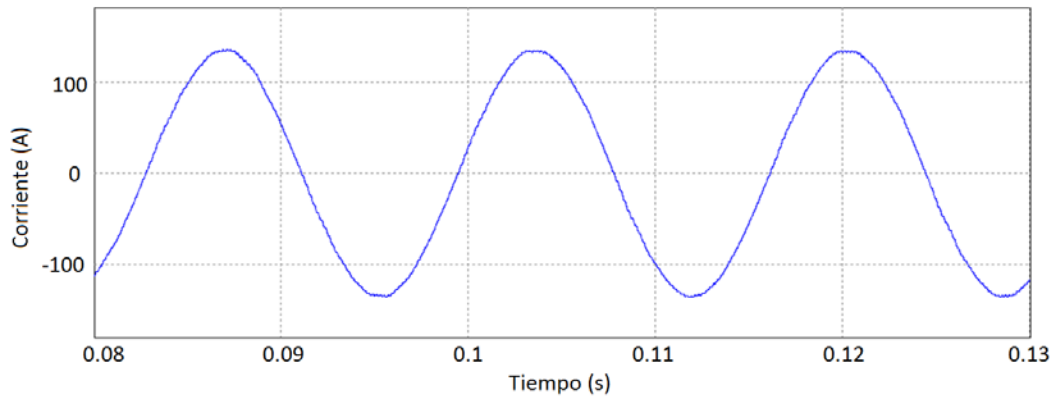


Figura 2.59, Corriente de Entrada Topología Rectificador VSI-Convertor de Medio Puente

Descripción	Valor
Corriente Máxima	135.2A
Corriente RMS	94.7A
Distorsión Armónica (THD)	0.998%

Tabla 14, Parámetros de la Topología Rectificador VSI-Convertor de Medio Puente

Los armónicos más significativos de esta topología se presentan en la Figura 2.60 y se resumen en la tabla 15. Se puede notar que los armónicos son impares y el armónico número diecisiete presenta el mayor valor con 0.48A, seguido por el treceavo armónico con 0.45A.

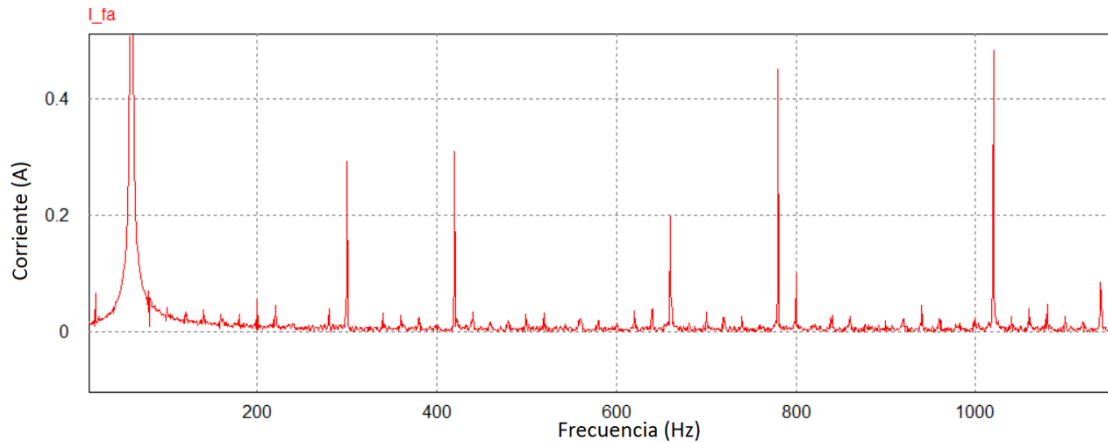


Figura 2.60, Armónicos generados por la Topología Rectificador VSI-Convertor de Medio Puente

Frecuencia Hz	Corriente Amperios	Numero de Armónico
300	0.29	5
420	0.31	7
660	0.19	11
780	0.45	13
1020	0.48	17

Tabla 15, Armónicos de la Topología Rectificador VSI-Convertor de Medio Puente

## 2.9 Conclusiones de la comparación de las Estaciones de carga.

Con el fin de obtener el modelo de estación de carga rápida que más se asemeje a la realidad y mejores prestaciones tenga, se han comparado las cuatro topologías simuladas en la sección 2.8.

De esta comparación se observa que las topologías que usan un rectificador de tipo VIENNA generan distorsión armónica en la corriente al funcionar a plena carga, por lo tanto, quedan descartadas.

En el caso de los convertidores aislados DC/DC, se ha podido observar que el convertidor de medio puente no presenta la robustez necesaria para trabajar con grandes potencias porque exige una relación de transformación el doble de grande que el convertidor de puente completo, aumentando el estrés eléctrico al que se someten los elementos de conmutación.

Como consecuencia de lo anteriormente mencionado, se ha establecido que la mejor topología para usar en los próximos estudios, es la de un rectificador VSI con un convertidor DC/DC de Puente Completo.

Los datos provenientes del análisis de la topología VSI-Convertidor de Puente Completo se han comparado con los resultados obtenidos en mediciones reales publicados por el “Joint Research Center” de la comisión Europea de Ciencia [36]. De esta comparación se observa que los armónicos principales resultantes de la simulación, coinciden con los de [36]. Siendo estos armónicos de orden impar y mostrados en la Figura 2.61.

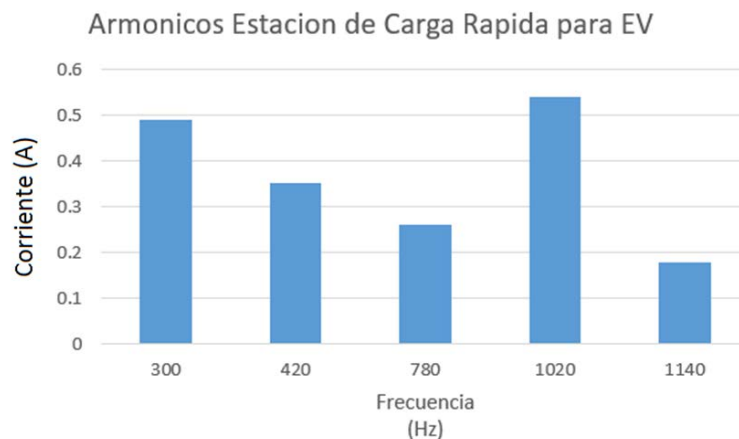


Figura 2.61, Armónicos de la Topología VSI-Convertidor Puente Completo

## CAPITULO 3

### Simulación de estaciones de carga rápida en un sistema de distribución eléctrico.

#### 3.1 Descripción

En este capítulo se utilizan los datos de potencia, voltaje y armónicos de corriente de la estación de carga rápida estimados en el capítulo 2 para implementarlos en un alimentador del sistema de distribución eléctrica de la ciudad de Cuenca-Ecuador. Esto con la finalidad de analizar el impacto que tendrá la futura implementación de estaciones de carga rápida en el sistema de media tensión de la ciudad.

Para este cometido se ha hecho uso del programa de simulación de redes de distribución eléctrica CYME, cuyas simulaciones han sido realizadas bajo la licencia de la Empresa Eléctrica Regional CENTROSUR.

#### 3.2 Características de la Estación de Carga Rápida a implementar

La estación de carga rápida es modelada como una carga que absorbe 50kW de potencia activa y genera los armónicos de corriente mostrados en la tabla 16, correspondiente a los armónicos de corriente con mayor valor de la topología VSI-Convertidor de Puente Completo analizado en el capítulo 2.

Numero de Armónico	Frecuencia (Hz)	Corriente (A)
1	60	117
5	300	0.49
7	420	0.353
13	780	0.26
17	1020	0.54
19	1140	0.18

Tabla 16, Armónicos para el modelamiento de la Estación de Carga Rápida

Las estaciones de carga rápida han sido modeladas como un tipo de cliente dentro del CYME, a fin de poder reconocer su consumo y además ser compatibles con el sistema existente de la empresa CENTROSUR. Entre los principales datos del perfil de cliente para la estación de carga rápida, se ha definido su potencia nominal y sus armónicos de corriente, esto se muestra en la Figura 3.1.

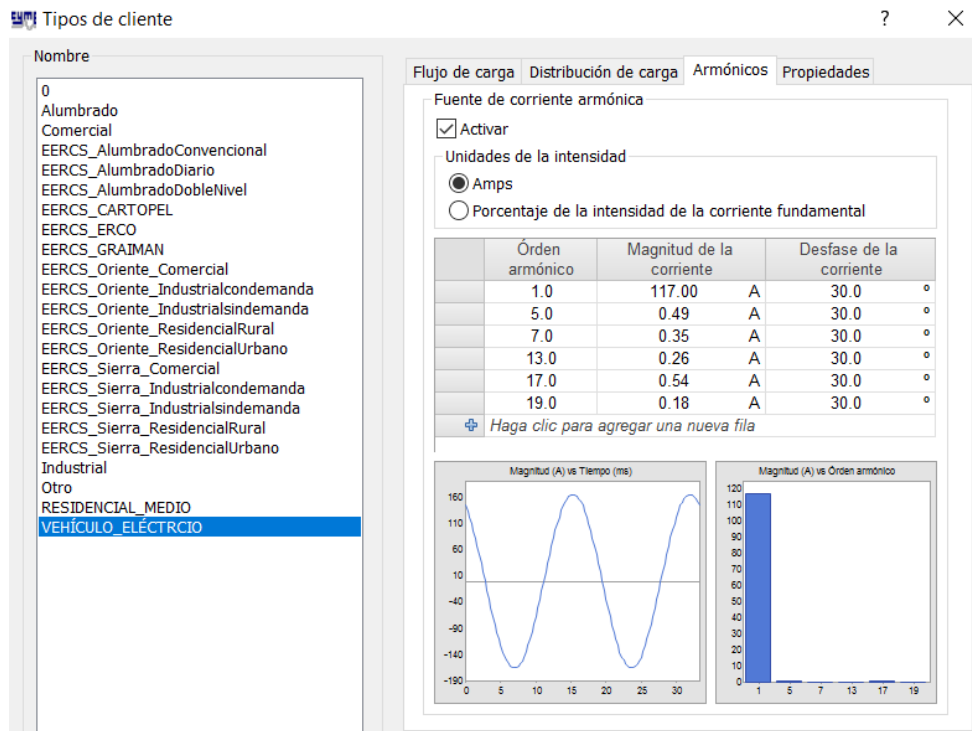


Figura 3.1, Modelo en CYME de una Estación de Carga Rápida

A fin de modelar las cuatro estaciones de carga rápida en el mismo lugar, se ha implementado un elemento de carga puntual que contiene cuatro clientes, de los cuales cada uno representa una estación de carga rápida. Esto se puede observar en la Figura 3.2.



Figura 3.2, Modelo de la Carga de 4 Estaciones de Carga Rápida en CYME.

Con el fin de implementar esta configuración de cargas dentro del sistema de distribución eléctrico a nivel de media tensión del simulador CYME, se emplea un transformador de distribución de 6.3kV a 380V trifásico con configuración Triangulo-Estrella de 200kVA con los parámetros mostrados en la Figura 3.3.

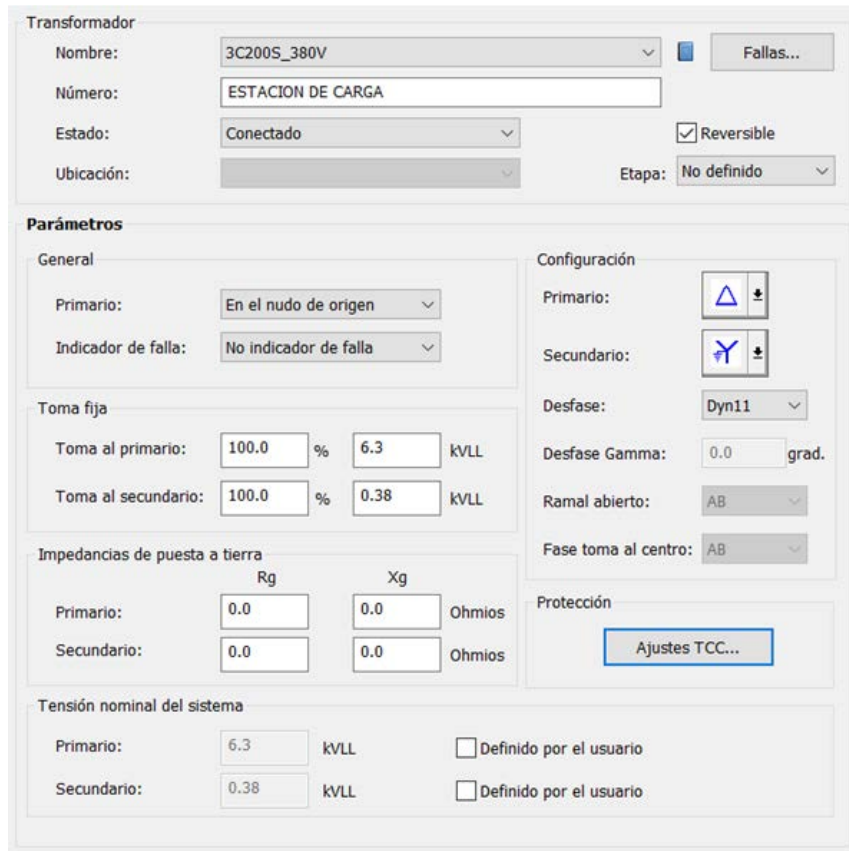


Figura 3.3, Modelo de CYME para transformador.

Con el modelo descrito en esta sección, se procede a realizar el análisis de armónicos y de flujos de potencia del alimentador correspondiente dentro del sistema de distribución eléctrica.

### 3.3 Descripción del Caso de Estudio.

Debido a la gran extensión que cubre el servicio eléctrico en la ciudad de Cuenca y sus alrededores, se ha optado por estimar el impacto de las estaciones de carga rápida únicamente en un alimentador que debe estar ubicado en una zona adecuada de la ciudad para el flujo vehicular en distintos horarios del día.

Para seleccionar el alimentador que servirá como caso de estudio se han tomado en cuenta varios criterios tanto técnicos, geográficos y sociales, los cuales se resumen en la siguiente sección.

#### 3.3.1 Criterios y Metodología para elegir del Alimentador

La determinación del alimentador idóneo para este caso de estudio, se basa en [37], donde se realiza una recopilación de distintos aspectos y características





geográficas, sociales y técnicas que debe cumplir un lugar para ser adecuado en la implementación de las estaciones de cargas rápida.

Con los criterios del estudio sobre ubicación de cargadores para vehículos eléctricos presentado en [37], se ha determinado que los lugares más aptos para la implementación de las estaciones de carga rápida y estaciones de carga de nivel 2 son los presentados en la tabla 17.

Aeropuerto	Parque de Diversiones	Acuario	Galería de Arte
Casino	Campo de Golf	Dentista	Tienda Departamental
Consultorio Medico	Tienda de Abastos	Supermercado	Hospital
Librería	Oficinas Gubernamentales	Alojamientos	Teatros
Museo	Parque	Restaurant	Centro Comercial
Estadio	Estación de Tren	Universidad	Zoológico

*Tabla 17, Lugares para estaciones de Carga [37]*

De entre los múltiples lugares recomendados para implementar las estaciones de carga rápida, se deben tener en cuenta la cantidad de automóviles que circulan durante el día, así como el tiempo que estos aparkan en cada sector.

Las características que deben cumplir los lugares para poder implementar estaciones de carga rápida son las siguientes: fácil acceso, adecuada alimentación eléctrica desde el sistema de media tensión, cercano a espacios públicos.

Para poder determinar los requerimientos mencionados anteriormente, se usó de la metodología implementada en [37], la cual plantea el flujograma de decisión para implementar una estación de carga de vehículos eléctricos mostrada en la Figura 3.4.



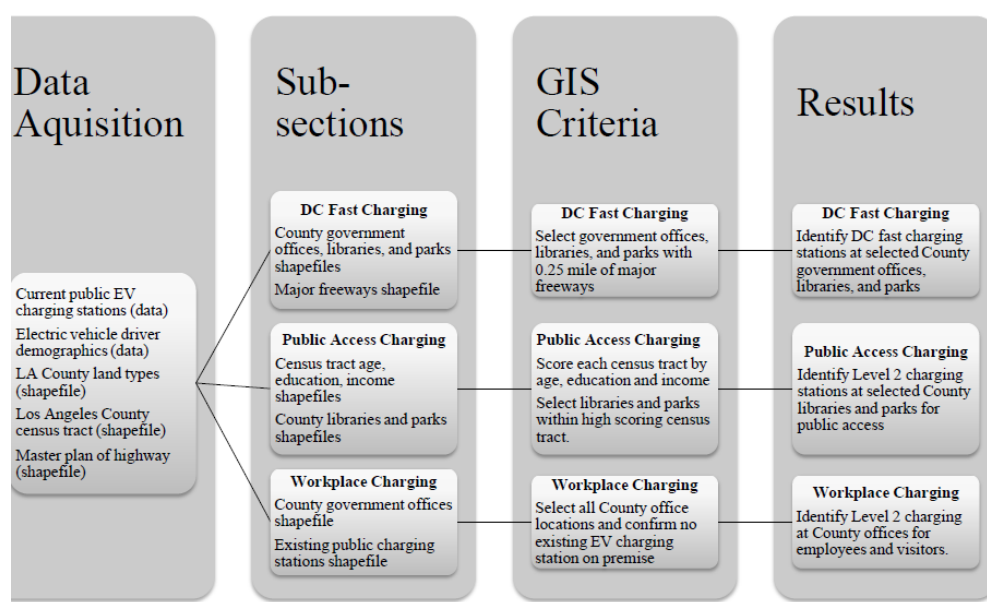


Figura 3.4, Flujograma de Decisión para localización de Estaciones de Carga

Del análisis basado en el flujograma y los criterios antes mencionados se ha optado por buscar un sitio que cuente con un flujo de automóviles elevado, así como con espacios de esparcimiento público y edificios gubernamentales. Es por ello que se requiere de un sector cercano a la zona centro administrativa de la ciudad, así como cercano a la zona comercial.

### 3.3.2 Sector idóneo para implementación de Estaciones de Carga Rápida

Uno de los sectores idóneos según los criterios estimados en la sección 3.3.1, es el correspondiente al de la zona comprendida entre la Av. Solano, la calle Doce de Abril, calle Paucarbamba y calle Manuel J. Calle, perteneciente a la Parroquia Huayna Cápac.

Según cifras del estudio realizado en [38] se estima que a través de la Av. Solano circulan diariamente al menos 55 mil vehículos.

Además, en este sector se encuentran: el Estadio Deportivo Alejandro Serrano Aguilar, el centro comercial Milenium Plaza, el edificio de Función Judicial del Azuay, el Parque de la Madre, los centros médicos Santa Ana, San Juan de Dios y el centro comercial "El Vergel". A continuación, se describen brevemente sus principales características.



Estadio Deportivo Alejandro Serrano Aguilar: Este estadio tiene una capacidad de 16.540 personas, de los cuales la asistencia promedio a eventos deportivos quincenales es de entre 5 y 10 mil personas.



*Figura 3.5, Estadio Alejandro Serrano Aguilar, ciudad de Cuenca*

Centro Comercial Milenium Plaza: Este centro comercial tiene un flujo de personas de entre 6 y 14 mil personas dependiendo el día de la semana.



*Figura 3.6, Centro Comercial Milenium Plaza, ciudad de Cuenca*

Edificio de la Función Judicial del Azuay: Atiende a aproximadamente 50 mil personas mensualmente según cifras de su página web.



*Figura 3.7, Edificio de la Función Judicial del Azuay, ciudad de Cuenca*



Parque de la Madre: Este parque tiene un parqueadero con capacidad para 140 vehículos, de los cuales según cifras de la EMOV, el 87% de los parqueos suelen estar ocupados.



*Figura 3.8, Parque de La Madre, ciudad de Cuenca*

Clínica Santa Ana: Debido a que este tipo de centro es de medicina de consulta, tiene un alto tráfico de personas, por lo tanto es importante tomarlo en cuenta.



*Figura 3.9, Clínica Santa Ana, ciudad de Cuenca*

Hospital San Juan de Dios: Este establecimiento dedicado a consultorios médicos, también presenta un alto tráfico de personas.



*Figura 3.10, Hospital San Juan de Dios, ciudad de Cuenca*



Centro Comercial El Vergel: En este centro comercial se encuentra el supermercado “Supermaxi” el cual al ser uno de los más concurridos por los cuencanos de clase media y alta, genera un alto tráfico vehicular en el sector.



Figura 3.11, Centro Comercial “El Vergel”, ciudad de Cuenca

### 3.3.3 Alimentador #0204 en Estudio

La zona en estudio corresponde al alimentador #0204 trifásico con voltaje de 6.3kV fase-fase, el cual parte desde la Subestación #2 (El Centenario) y tiene una capacidad planificada de alimentador de aproximadamente 4MVA. En la Figura 3.12 se puede observar la cobertura que tiene el alimentador #0204.

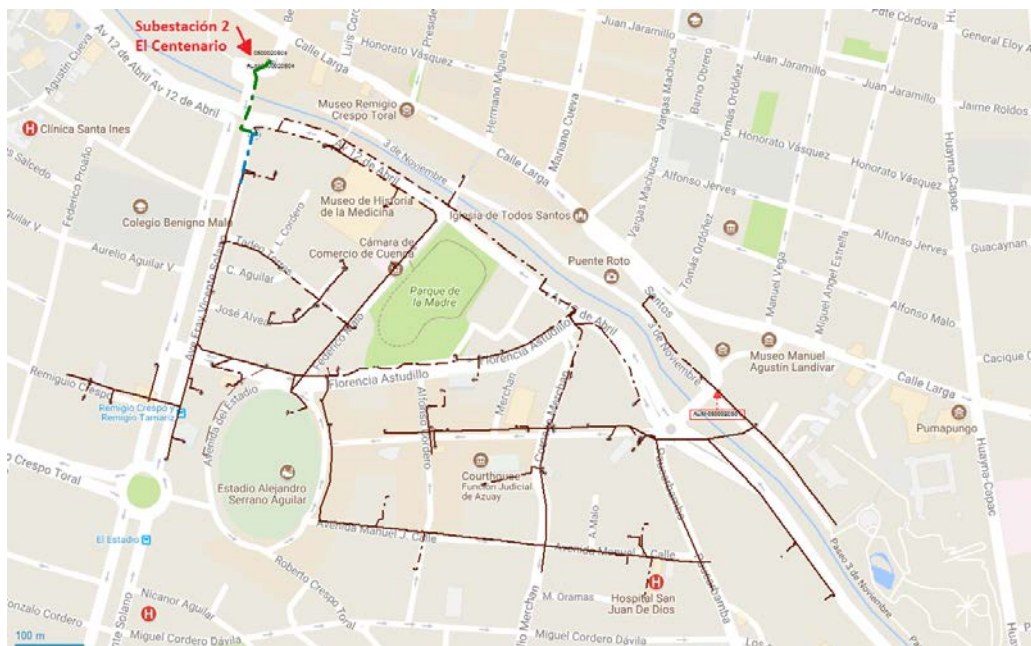


Figura 3.12, Área de cobertura del Alimentador #0204

### 3.3.4 Ubicación de las estaciones de Carga Rápida

La ubicación de las estaciones de carga rápida se ha escogido según los criterios mencionados en la sección 3.3.2, concluyendo que la mejor ubicación es el parqueadero del Parque de la Madre, visto en la Figura 3.13 por las siguientes razones.

- ✓ Es un espacio público que está bajo la administración municipal, por tanto, permitirá la implementación por parte del gobierno de las estaciones de carga rápida.
- ✓ Es el parqueadero con mayor acceso y mayor número de plazas de estacionamiento del sector.
- ✓ Según el estudio de la EMOV, su capacidad es ocupada en un 87% aproximadamente, esto permite implementar las estaciones de carga rápida en las plazas de aparcamiento libres.
- ✓ Al ser un parqueadero que está abierto las 24 horas de miércoles a sábado y de 6am a 10pm el resto de días. Es el parqueadero que más tiempo está abierto al público.
- ✓ Al contar con vigilancia durante las 24 horas, brinda protección contra el vandalismo a las estaciones de carga rápida.
- ✓ Se encuentra en medio de la zona comercial y el centro administrativo de la ciudad.

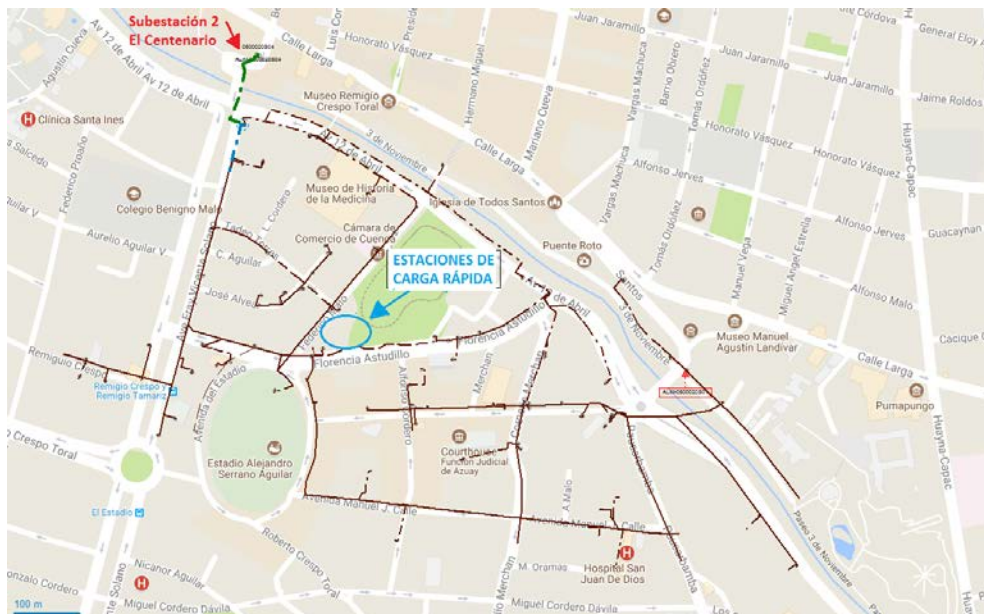


Figura 3.13, Ubicación Estación de Carga Rápida.

El alimentador en estudio se forma en su mayoría por tramos aéreos representados por líneas continuas, a excepción de la zona de la Av. 12 de Abril, en donde existen tramos subterráneos presentados con líneas entrecortadas. Con el fin de tener una mejor percepción de las características de carga del alimentador, se han establecido diferentes colores para los distintos tramos de media tensión en función de la capacidad que tienen sus líneas. Las líneas cercanas a la cabecera del alimentador tienen una capacidad de más de 250A y las más alejadas y ramales tienen una capacidad de más de 100A.



Se han establecido diferentes nodos de interés, en los cuales se analizan las variaciones de voltaje antes y después de implementar las estaciones de carga rápida para vehículos eléctricos, esto se observa claramente en la Figura 3.15

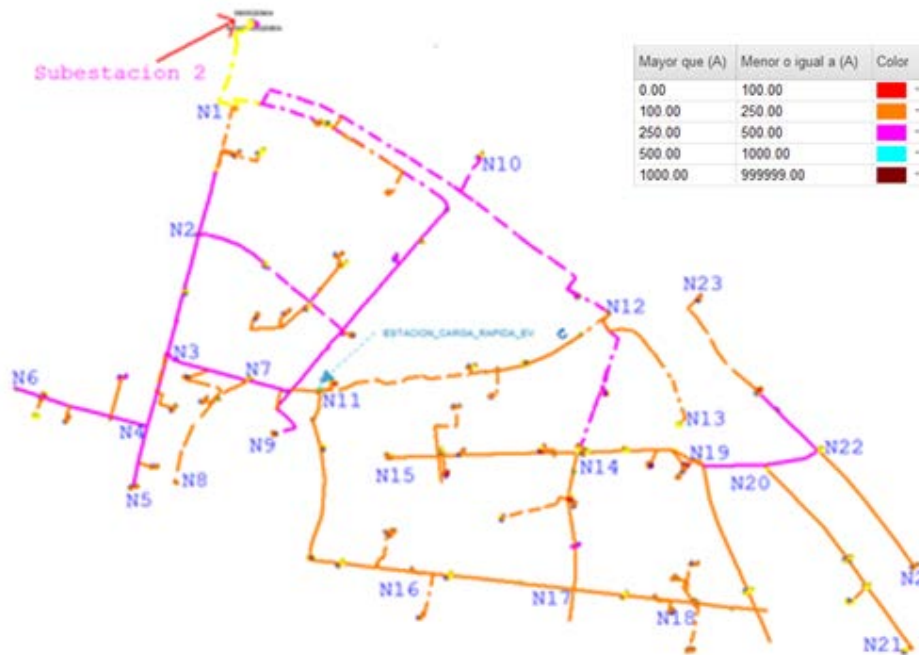


Figura 3.15, Nodos para el Análisis

### 3.4 Análisis Gráfico del impacto de las Estaciones de Carga.

Con el fin de analizar los posibles impactos de la implementación de cuatro estaciones de carga rápida para vehículos eléctricos en el estacionamiento del Parque de la Madre sobre el alimentador #0204 ubicado en la calle 12 de Abril y Florencia Astudillo, se ha decidido comparar gráficamente las condiciones actuales del alimentador tomados del sistema de información de la empresa eléctrica CENTROSUR con las que se estiman luego de la implementación de las estaciones de carga.

#### 3.4.1 Densidad de Carga en la zona cubierta por el Alimentador

Los mapas de la Figura 3.16 y Figura 3.17 correspondientes al alimentador en estudio presentan las densidades de carga instaladas en las diferentes zonas que se abastecen del alimentador en estudio, en donde se aprecian diferentes colores en función del consumo de energía que se tengan los distintos nodos, a fin de contrastar antes y después de implementar las estaciones de carga rápida para los vehículos eléctricos.



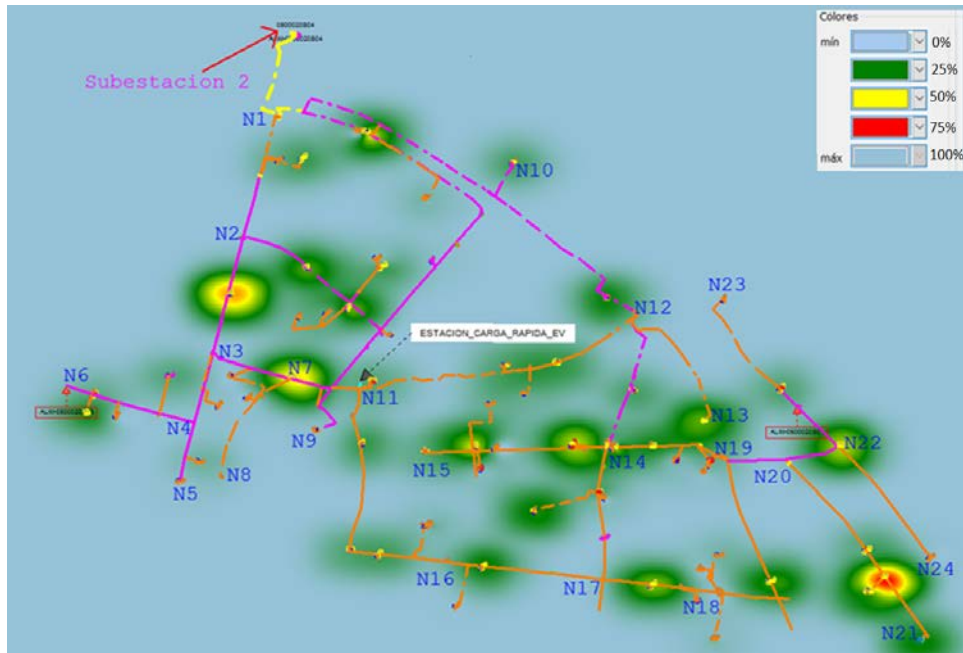


Figura 3.16, Densidad de Carga Instalada Sin Estaciones de Carga Rápida

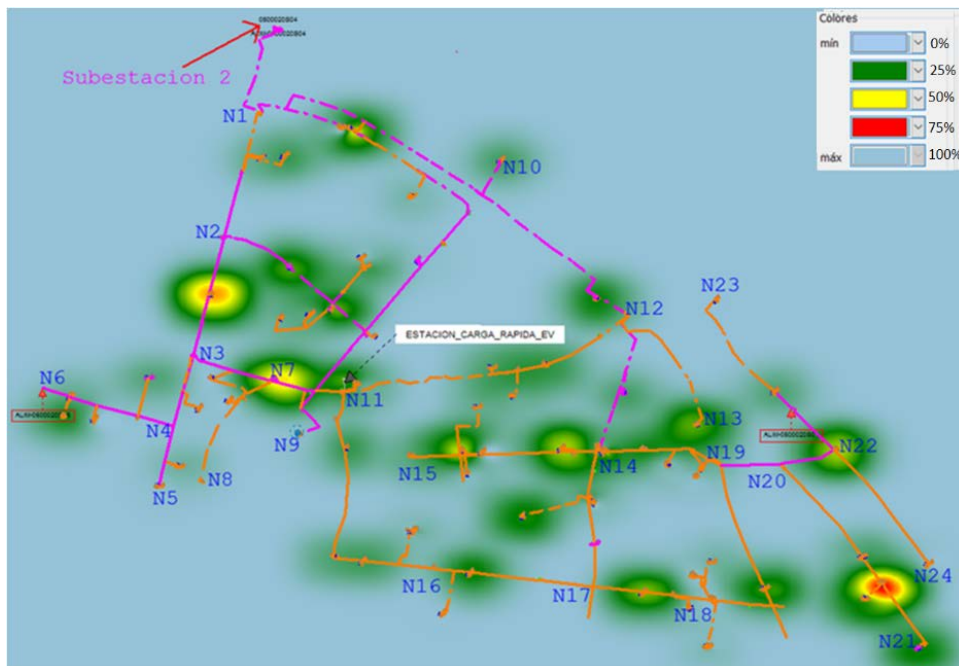


Figura 3.17, Densidad de Carga Instalada Con Estaciones de Carga Rápida

Como se puede observar, el impacto de las estaciones de carga rápida como carga instalada es muy pequeño comparado con el resto de cargas que absorben energía del alimentador.

El cambio en la carga en el nodo 7 correspondiente a la ubicación de las estaciones de carga se puede apreciar más fácilmente en la Figura 3.18 y Figura 3.19 en donde se aprecia que el cambio de densidad de carga es muy bajo.



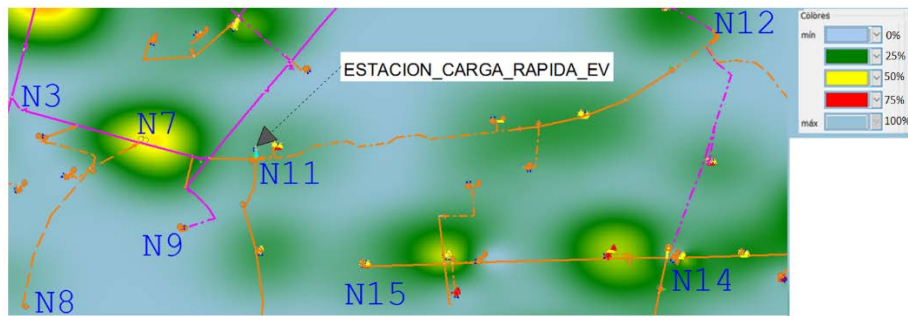


Figura 3.18, Densidad de Carga Instalada Sin Estaciones de Carga Rápida-Acercamiento

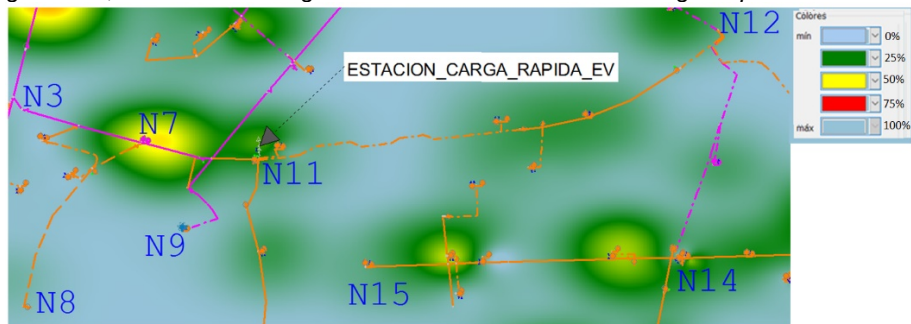


Figura 3.19, Densidad de Carga Instalada Con Estaciones de Carga Rápida-Acercamiento

### 3.4.2 Densidad de Flujo de Potencia en las líneas del Alimentador

Un tema importante para definir la factibilidad de la implementación de las estaciones de carga rápida, es el cambio de la densidad de los flujos de potencia que existirán a través de las líneas de media tensión correspondientes al alimentador, esto se puede apreciar en la Figura 3.20 y Figura 3.21 correspondiente al alimentador antes y después de la implementación de las estaciones de carga rápida, en donde se aprecia que los mayores flujos de potencia se dan entre los nodos N1-N10-N12-N14-N20 y N1-N2-N3.

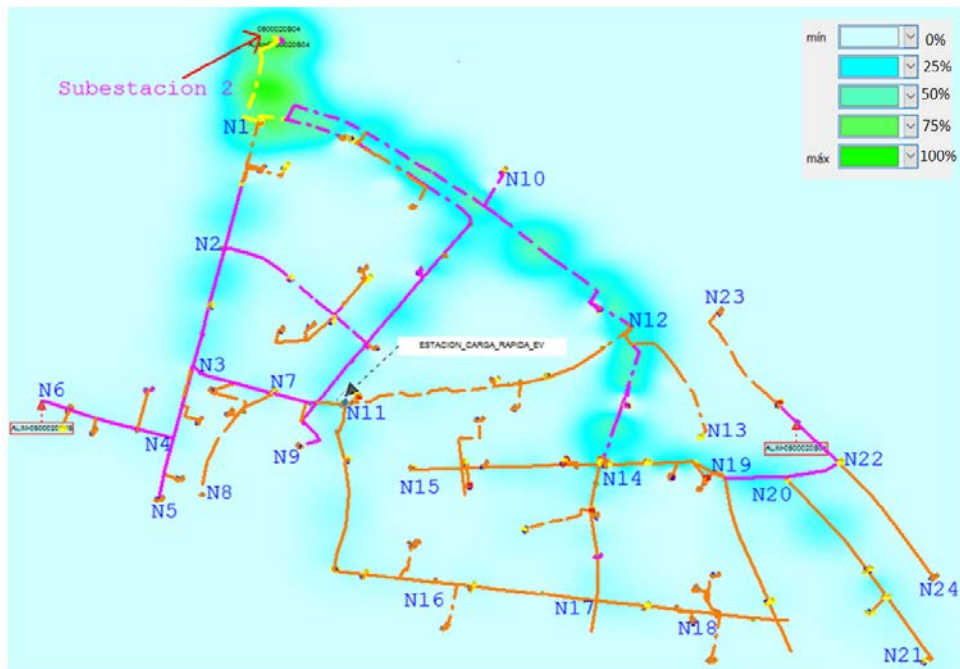


Figura 3.20, Densidad de Flujo de Potencia Sin Estaciones de Carga Rápida

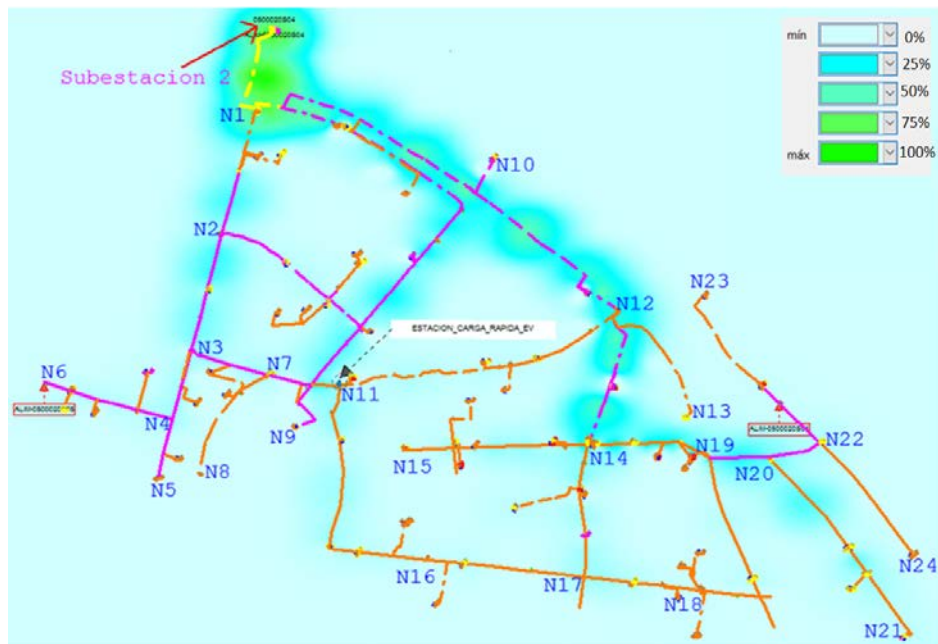


Figura 3.21, Densidad de Flujo de Potencia Con Estaciones de Carga Rápida

El cambio en la densidad de los flujos de carga a través de las líneas del alimentador es despreciable, por lo que se puede afirmar que las estaciones de carga rápida no afectan al flujo de carga de manera significativa.

### 3.4.3 Niveles de Voltaje

Con el fin de analizar de manera gráfica los niveles de tensión que existen en los diversos tramos del alimentador se empleara la escala de colores mostrados en la Figura 3.22 para un voltaje base de 6.3kV. En la Figura 3.23 se aprecian los niveles actuales de tensión del alimentador y en la Figura 3.24 se pueden apreciar los niveles de tensión del alimentador con la implementación de estaciones de carga rápida.

	<input checked="" type="checkbox"/> Mayor que (%)	Menor o igual a (%)	Anchura de línea	Color
1	<input checked="" type="checkbox"/> 0.00	97.00	1	Yellow
2	<input checked="" type="checkbox"/> 97.00	97.50	3	Magenta
3	<input checked="" type="checkbox"/> 97.50	98.00	3	Orange
4	<input checked="" type="checkbox"/> 98.00	98.50	3	Blue
5	<input checked="" type="checkbox"/> 98.50	99.00	3	Red
6	<input checked="" type="checkbox"/> 99.00	99.50	3	Green
7	<input checked="" type="checkbox"/> 99.50	100.00	3	Dark Blue
8	<input checked="" type="checkbox"/> 100.00	103.00	3	Dark Red
9	<input checked="" type="checkbox"/> 103.00	99999.00	3	Black

Figura 3.22, Escala de Colores para Niveles de Tensión

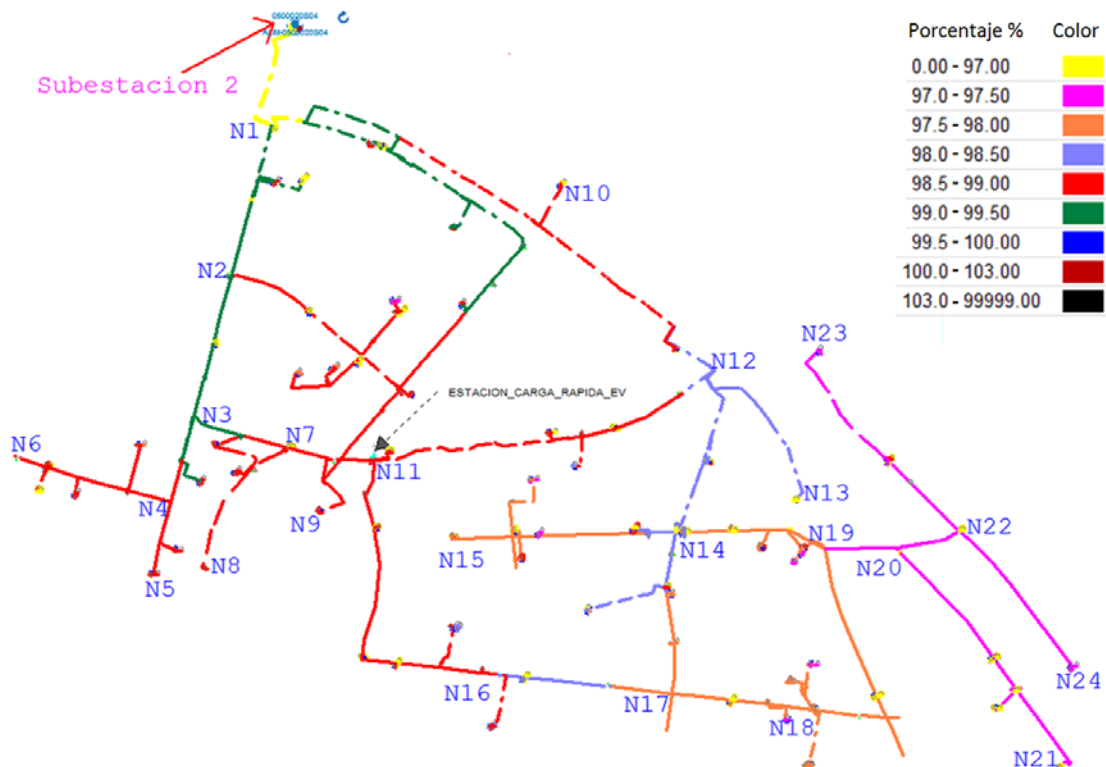


Figura 3.23, Niveles de Tensión Sin Estaciones de Carga

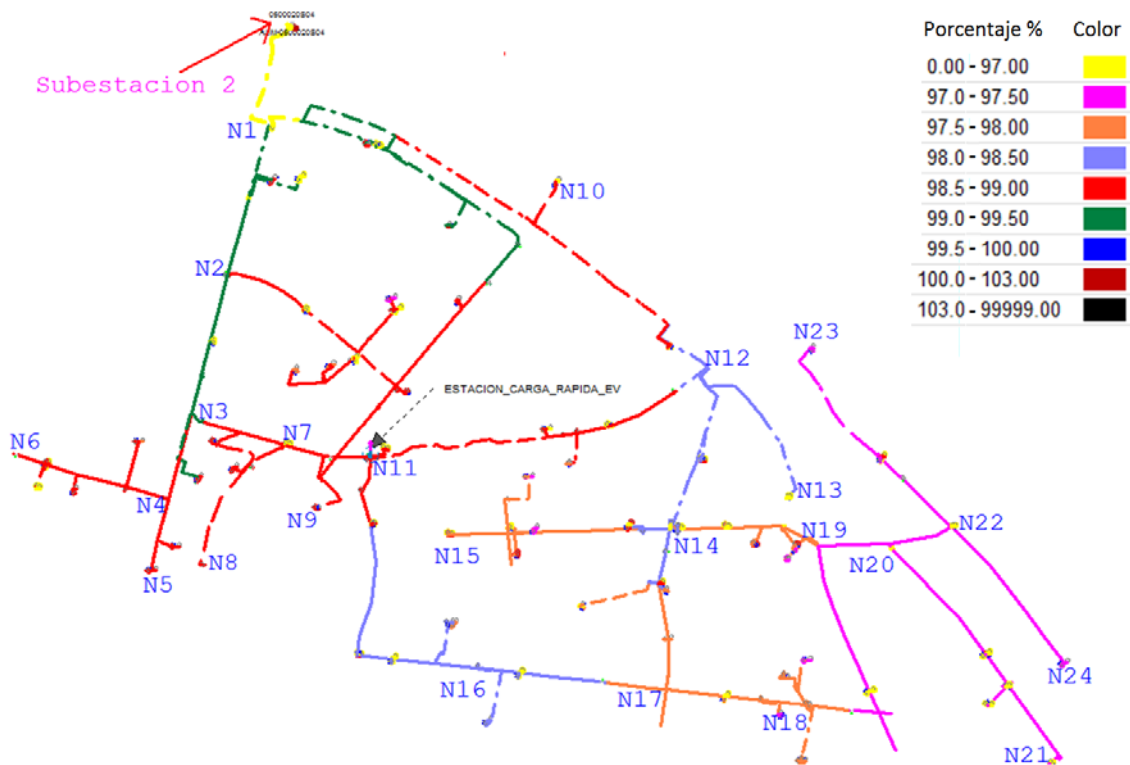


Figura 3.24, Niveles de Tensión Con Estaciones de Carga

De la comparación de las gráficas de los niveles de tensión, se puede notar que existen caídas de tensión de aproximadamente 0.5% en las líneas comprendidas entre los nodos N11 y N16 cuyos voltajes pasaron de estar entre el 98.5%-99% a estar entre el 98%-98.5% de su tensión nominal. Lo mismo ocurrió con la línea comprendida entre N20 y N18 cuyo voltaje paso de estar entre el 97.5%-98% a estar entre el 97%-97.5% de la tensión nominal, esto significa que el impacto causado por las estaciones de carga en la tensión de las líneas es muy bajo.

#### 3.4.4 Dirección de Flujos de Potencia

La dirección de los flujos de potencia puede repercutir directamente en el comportamiento de la red y por esta razón, se muestran las direcciones de los flujos de potencia tanto activa como reactiva representados por flechas, antes y después de la implementación de las estaciones de carga rápida.

Potencia Activa.- La Figura 3.25 y Figura 3.26 muestran los flujos de potencia activa en la zona en estudio tanto en condiciones actuales del alimentador como luego de haber implementado las estaciones de carga. Se puede observar que no existen cambios en las direcciones de flujo de potencia activa.



Figura 3.25, Dirección de Flujos de Potencia Activa Sin Estaciones de Carga

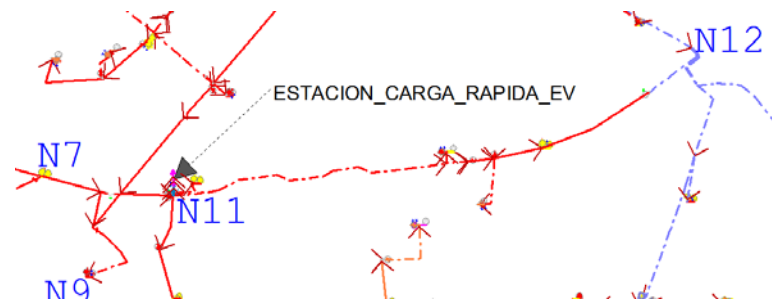


Figura 3.26, Dirección de Flujos de Potencia Activa Con Estaciones de Carga

Potencia Reactiva.- La potencia reactiva fluye desde los niveles de voltaje más altos hacia los más bajos, el flujo de reactivos se muestra en la Figura 3.27 y Figura 3.28. La primera figura muestra el flujo de potencia en condiciones actuales del alimentador mientras que la segunda muestra el flujo de reactivos luego de implementar las estaciones de carga rápida. En las imágenes se puede observar que no hay variaciones entre los dos casos.



Figura 3.27, Dirección de Flujos de Potencia Reactiva Sin Estaciones de Carga



Figura 3.28, Dirección de Flujos de Potencia Reactiva Con Estaciones de Carga

### 3.4.5 Porcentaje de Carga de cada Línea.

Para que la implementación de las estaciones de carga rápida no comprometa la capacidad de las líneas del alimentador, se analiza el porcentaje de carga de cada línea mediante la escala de colores mostrada en la Figura 3.29 que indica el porcentaje de carga ocupado en función de la capacidad nominal de las líneas.

Mayor que (%)	Menor o igual a (%)	Color
0.00	10.00	Grigio
10.00	20.00	Verde
20.00	30.00	Verde Oscuro
30.00	40.00	Cian
40.00	50.00	Azul
50.00	60.00	Azul Oscuro
60.00	70.00	Púrpura
70.00	80.00	Púrpura Oscuro
80.00	90.00	Magenta
90.00	100.00	Naranja
100.00	105.00	Marrón
105.00	99999.00	Negro

Figura 3.29, Escalas de Capacidad Ocupada por las Líneas del Alimentador

En la Figura 3.30 se muestran las condiciones de carga ocupadas actualmente de las líneas del alimentador, en donde se observa que la capacidad en la mayoría del alimentador no supera el 70% de su capacidad nominal.

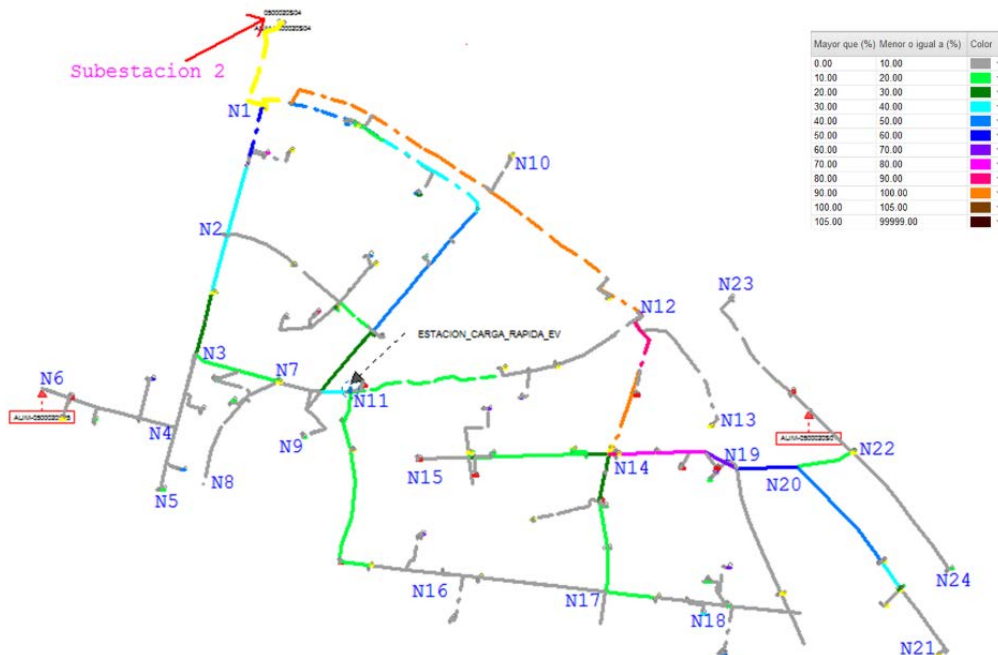


Figura 3.30, Capacidad de Carga ocupada del Alimentador Sin Estaciones de Carga

En la Figura 3.31 correspondiente a la red de distribución con la inclusión de las estaciones de carga rápida, se observa que la capacidad utilizada del alimentador es la misma puesto que un cambio en el color de la línea implicaría una variación máxima de 10% en la capacidad utilizada de la línea.



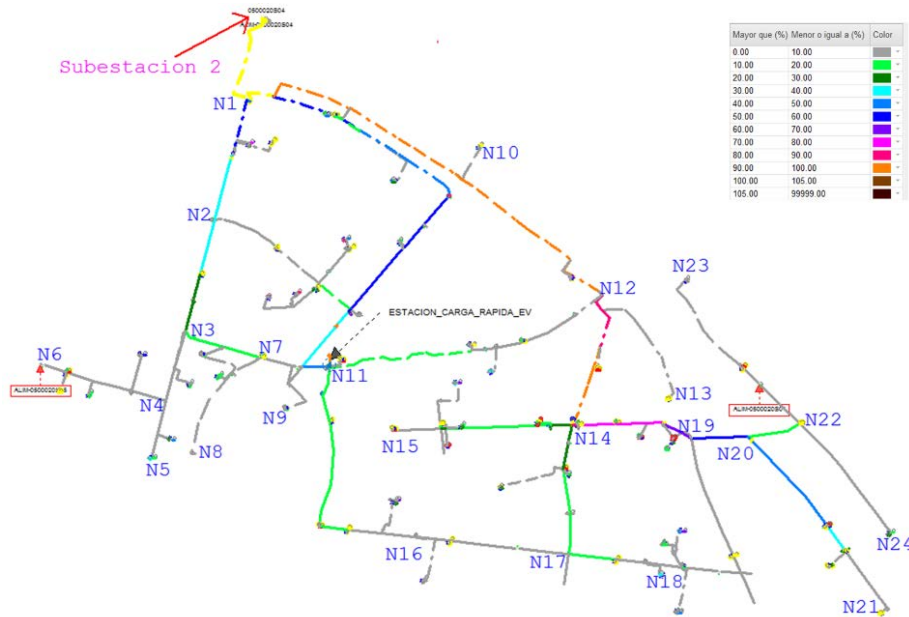


Figura 3.31, Capacidad de Carga ocupada del Alimentador Con Estaciones de Carga

### 3.5 Análisis Estadístico del Impacto de las Estaciones de Carga Rápida en los Flujos de carga del Alimentador

Para tener datos fiables en puntos específicos y de interés del alimentador en estudio, se han tomado las mediciones calculadas por el programa CYME a fin de extrapolar datos de las condiciones de operación tanto antes como después de implementar las estaciones de carga rápida.

En este caso se ha optado por analizar los cambios en la cabecera del alimentador, así como niveles de tensión en los diferentes nodos y los cambios de flujos de potencia en ciertas líneas de interés líneas.

#### 3.5.1 Análisis en la Cabecera del Alimentador

Con el fin de tener una idea general del impacto que tienen las estaciones de carga rápida en el alimentador, se ha realizado el análisis mostrado en la Tabla 18, en donde se aprecia que la tensión varía en un 0.016%, porcentaje que se podría considerar muy bajo dentro de los parámetros de un alimentador.

Voltaje Línea-Línea			
	Actual (kV)	Con Estaciones de Carga (kV)	Variación (%)
Fase A	6.269	6.268	0.016%
Fase B	6.269	6.268	0.016%
Fase C	6.269	6.268	0.016%

Tabla 18, Voltajes en Cabecera del Alimentador



Se puede observar en la Tabla 19 que el aumento del flujo de potencia activa es de 4.23%, el de potencia reactiva es de 0.83% y el de potencia aparente es de 2.7%, lo que significa un aumento muy bajo que no afecta la capacidad del alimentador.

Potencia			
	Actual	Con Estaciones de Carga	Variación (%)
Activa (kW)	7565	7886	4.243%
Reactiva (kVAR)	1311	1322	0.839%
Aparente (kVA)	7678	7886	2.709%

*Tabla 19, Flujo de Potencia en la Cabecera del Alimentador*

### 3.5.2 Análisis de Voltajes en los Nodos

Uno de los aspectos más importantes en una red de distribución eléctrica es la caída de tensión en diferentes puntos, es por ello que en este trabajo se ha realizado el estudio de las caídas de voltajes en los 25 nodos más importantes de la red cuyas ubicaciones se aprecian en la sección 3.4. En la Tabla 20 se puede observar los voltajes en cada uno de los nodos antes y después de implementar las estaciones de carga rápida.

Se aprecia claramente que la máxima caída de tensión se da en el nodo N21, en donde pasa de ser 2.97% a 2.98% notándose un aumento despreciable.

Los nodos que mayor cambio en su tensión presentaron, son N11 y N16 con un aumento de 0.11% en su caída de tensión. Esto indica claramente que los cambios se pueden considerar de bajo impacto en las condiciones de operación de la red.



	Condiciones Actuales		Con Estaciones de Carga Rápida	
Nodo	Voltaje L-L (kV)	Caída de Tensión	Voltaje L-L (kV)	Caída de Tensión
N01	6.269	0.49%	6.268	0.51%
N02	6.225	1.19%	6.22	1.27%
N03	6.239	0.97%	6.238	0.98%
N04	6.237	1.00%	6.236	1.02%
N05	6.236	1.02%	6.235	1.03%
N06	6.234	1.05%	6.233	1.06%
N07	6.236	1.02%	6.234	1.05%
N08	6.236	1.02%	6.234	1.05%
N09	6.235	1.03%	6.234	1.05%
N10	6.229	1.13%	6.228	1.14%
N11	6.219	1.29%	6.212	1.40%
N12	6.201	1.57%	6.2	1.59%
N13	6.197	1.63%	6.195	1.67%
N14	6.177	1.95%	6.176	1.97%
N15	6.168	2.10%	6.167	2.11%
N16	6.206	1.49%	6.199	1.60%
N17	6.172	2.03%	6.17	2.06%
N18	6.168	2.10%	6.167	2.11%
N19	6.146	2.44%	6.145	2.46%
N20	6.137	2.59%	6.135	2.62%
N21	6.113	2.97%	6.112	2.98%
N22	6.134	2.63%	6.133	2.65%
N23	6.133	2.65%	6.132	2.67%
N24	6.134	2.63%	6.132	2.67%

Tabla 20, Voltajes en los Nodos

### 3.5.3 Análisis de Flujos de Potencia en Tramos de Interés

Como ya se mencionó en la sección 3.4.5, un aspecto importante a considerar es la energía que circula a través de las líneas del alimentador. Es por ello que en esta sección se realiza un análisis del aumento de los flujos de potencia en las líneas cercanas a ciertos nodos de interés. Para Identificar a dichas líneas, se las ha nombrado con referencia al nodo que están enlazadas y la dirección cardinal a la que se orientan a partir del nodo, empleando la misma distribución de nodos usada en el análisis grafico de la sección 3.4.

#### Potencia Activa

Los cambios en los flujos de potencia activa se pueden apreciar en la Tabla 21, en donde se observa también el porcentaje de aumento que tienen los flujos debido a la inclusión de las estaciones de carga rápida.

Potencia Activa			
Línea	Sin Estaciones de Carga (kW)	Con Estaciones de Carga (kW)	Aumento de Potencia
N1_N	7565	7774	2.76%
N1_S	1338	1338	0.00%
N1_E	6183	6390	3.35%
N2_N	1169	1169	0.00%
N2_S	1168	1168	0.00%
N2_E	0	0	0.00%
N3_N	737	737	0.00%
N3_S	334	334	0.00%
N3_E	394	394	0.00%
N7_S	0	0	0.00%
N7_E	10	10	0.00%
N7_O	375	375	0.00%
N10_S	89	89	0.00%
N11_S	510	510	0.00%
N11_E	265	265	0.00%
N11_O	844	1048	24.17%
N12_NO	3924	3924	0.00%
N12_SO	0	0	0.00%

Tabla 21, Flujos de Potencia Activa

Los cambios de flujo de potencia activa en las líneas N1\_N y N1\_E son menores al 3.35%. La línea N11\_O tiene el mayor aumento de 24.17% debido a que es la que se conecta directamente a las estaciones de carga rápida. En el resto de líneas no se aprecia aumento alguno del flujo de potencia activa.

### Potencia Reactiva

La Tabla 22 muestra los flujos de potencia reactiva en las líneas, de aquí se puede observar que el aumento es muy bajo en las líneas N1\_N y N1\_E de cabecera. En el caso de la línea que alimenta a las estaciones de carga, esta muestra un aumento de apenas 5.83%, esto debido a que las estaciones de carga rápida consumen muy pocos reactivos.



Potencia Reactiva			
Línea	Sin Estaciones de Carga (kVAR)	Con Estaciones de Carga (kVAR)	Aumento de Potencia
N1_N	1311	1322	0.84%
N1_S	281	281	0.00%
N1_E	1000	1010	1.00%
N2_N	262	262	0.00%
N2_S	260	260	0.00%
N2_E	0	0	0.00%
N3_N	133	133	0.00%
N3_S	37	37	0.00%
N3_E	95	95	0.00%
N7_S	0	0	0.00%
N7_E	1	1	0.00%
N7_O	93	93	0.00%
N10_S	2	2	0.00%
N11_S	68	68	0.00%
N11_E	27	27	0.00%
N11_O	103	109	5.83%
N12_NO	624	624	0.00%
N12_SO	0	0	0.00%

Tabla 22, Flujos de Potencia Reactiva

### Potencia Aparente

Siendo la potencia aparente el conjunto de las potencias activas y reactivas, se observa claramente en la Tabla 23 que el aumento de las líneas de cabecera N1\_N y N1\_E no supera el 3.27%, esto significa que como ya se mostró en la sección 3.5.1, la capacidad del alimentador no se ve comprometida por la instalación de las estaciones de carga rápida.

En lo que se refiere a la línea N11\_O, esta tiene un aumento de 23.85% de su flujo de carga, cuyo impacto se analiza en la siguiente sección.



Potencia Aparente			
Línea	Sin Estaciones de Carga (kVA)	Con Estaciones de Carga (kVA)	Aumento de Potencia
N1_N	7678	7886	2.71%
N1_S	1367	1367	0.00%
N1_E	6264	6469	3.27%
N2_N	1198	1198	0.00%
N2_S	1196	1196	0.00%
N2_E	0	0	0.00%
N3_N	748	748	0.00%
N3_S	336	336	0.00%
N3_E	406	406	0.00%
N7_S	0	0	0.00%
N7_E	10	10	0.00%
N7_O	386	386	0.00%
N10_S	89	89	0.00%
N11_S	514	514	0.00%
N11_E	266	266	0.00%
N11_O	851	1054	23.85%
N12_NO	3973	3973	0.00%
N12_SO	0	0	0.00%

Tabla 23, Flujo de Potencia Aparente

### Carga de las líneas del Alimentador

Un parámetro determinante para conocer la viabilidad de la implementación de carga rápida es que la red de distribución no exceda su capacidad, es por ello que en la Tabla 24 se muestra el porcentaje de carga que tiene cada línea. De esta tabla, se observa que las líneas de cabecera están trabajando sobre su capacidad nominal sin embargo la implementación de las estaciones de carga solo aumenta en un 6.3% su carga. En el caso de la línea N11\_O que alimenta directamente a las estaciones de carga, esta se encuentra trabajado a menos del 40% de su capacidad nominal con un aumento de 7.8% con respecto a su estado actual.

Capacidad Utilizada			
Línea	Sin Estaciones de Carga (%)	Con Estaciones de Carga (%)	Aumento de Carga
N1_N	234.30%	240.60%	6.30%
N1_S	54.80%	54.80%	0.00%
N1_E	144.20%	149.00%	4.80%
N2_N	35.10%	35.10%	0.00%
N2_S	35.10%	35.10%	0.00%
N2_E	0.00%	0.00%	0.00%
N3_N	22.00%	22.00%	0.00%
N3_S	9.90%	9.90%	0.00%
N3_E	11.90%	11.90%	0.00%
N7_S	0.00%	0.00%	0.00%
N7_E	0.30%	0.30%	0.00%
N7_O	11.30%	11.30%	0.00%
N10_S	2.10%	2.10%	0.00%
N11_S	19.70%	19.70%	0.00%
N11_E	10.70%	10.80%	0.10%
N11_O	32.60%	40.40%	7.80%
N12_NO	92.40%	92.40%	0.00%
N12_SO	0.00%	0.00%	0.00%

Tabla 24, Capacidad Utilizada de las líneas del Alimentador

### 3.6 Análisis de Armónicos generados por las Estaciones de Carga Rápida

Los elementos basados en electrónica de potencia generan armónicos de corriente debido a la conmutación de sus interruptores de estado sólido. Es por ello que en esta sección se analiza el impacto de los armónicos de corriente generados por las estaciones de carga rápida analizadas en el capítulo 2 tomando como referencia la norma para armónicos IEEE 519-2014.

#### 3.6.1 Impacto de Armónicos en los Voltajes de los Nodos

Para este análisis, se han tomado los valores de los armónicos de corriente en los 24 nodos de interés señalados a lo largo de este capítulo.

En la Figura 3.32, Figura 3.33 y Figura 3.34 se muestran los armónicos de voltaje en los distintos nodos del alimentador correspondientes a las fases A, B y C

respectivamente antes de implementar las estaciones de carga rápida en el sistema. En dichas figuras se observa que los armónicos son muy pequeños.

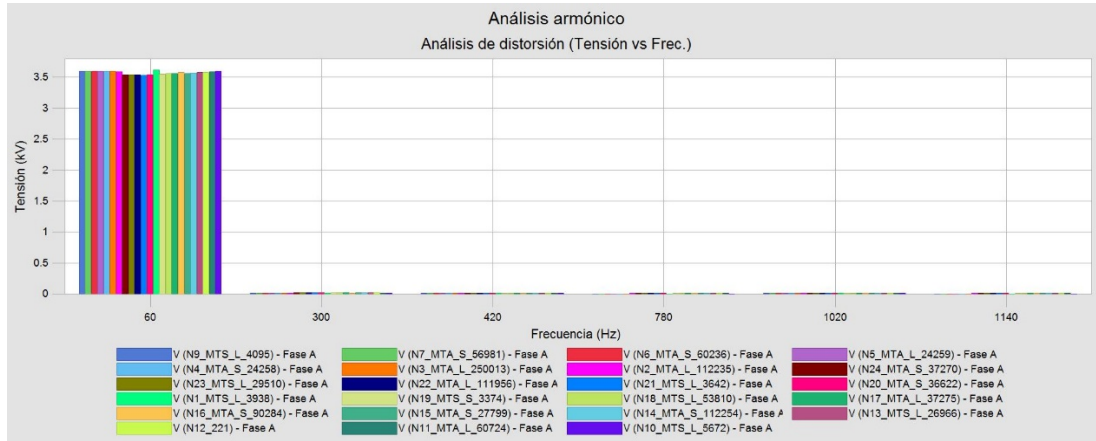


Figura 3.32, Análisis de Armónicos de Tensión Sin Estaciones de Carga Fase A

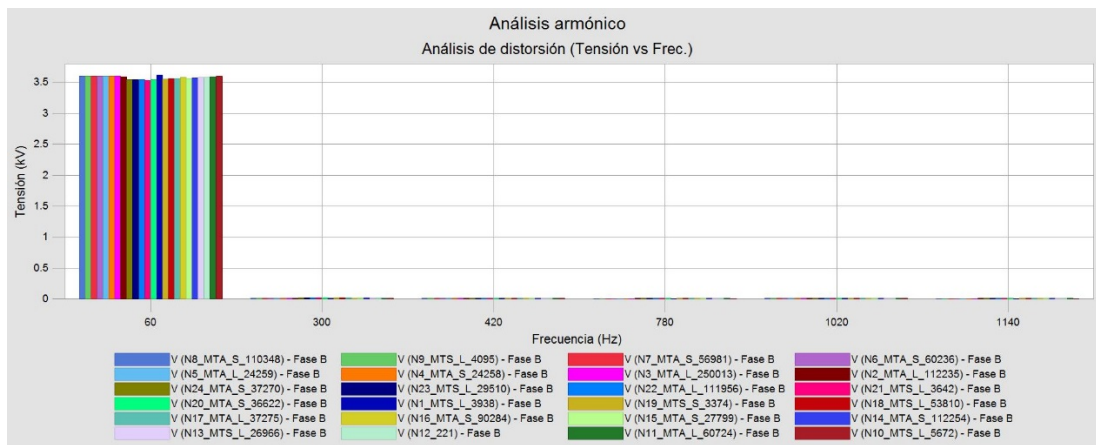


Figura 3.33, Análisis de Armónicos de Tensión Sin Estaciones de Carga Fase B

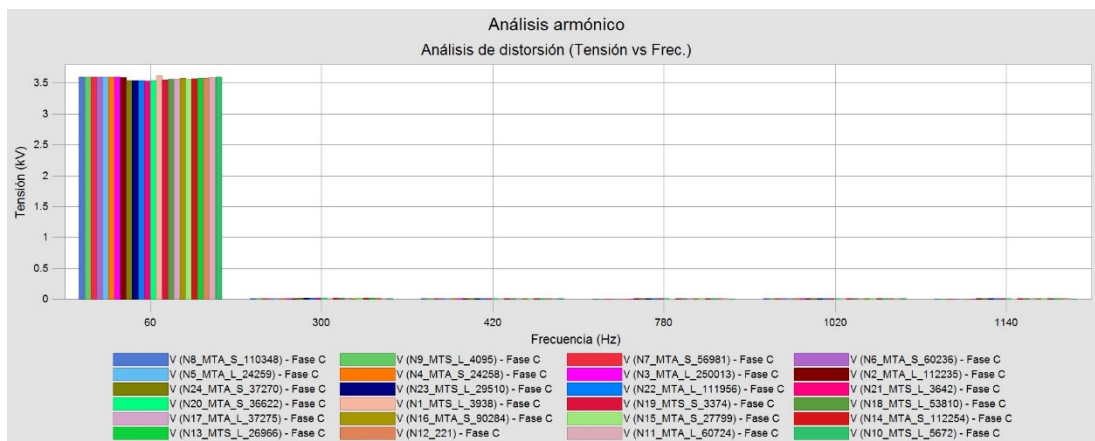


Figura 3.34, Análisis de Armónicos de Tensión Sin Estaciones de Carga Fase C

En la Figura 3.35, Figura 3.36 y Figura 3.37 se pueden observar las gráficas de los armónicos de tensión en los nodos del alimentador luego de implementar las estaciones de carga rápida.

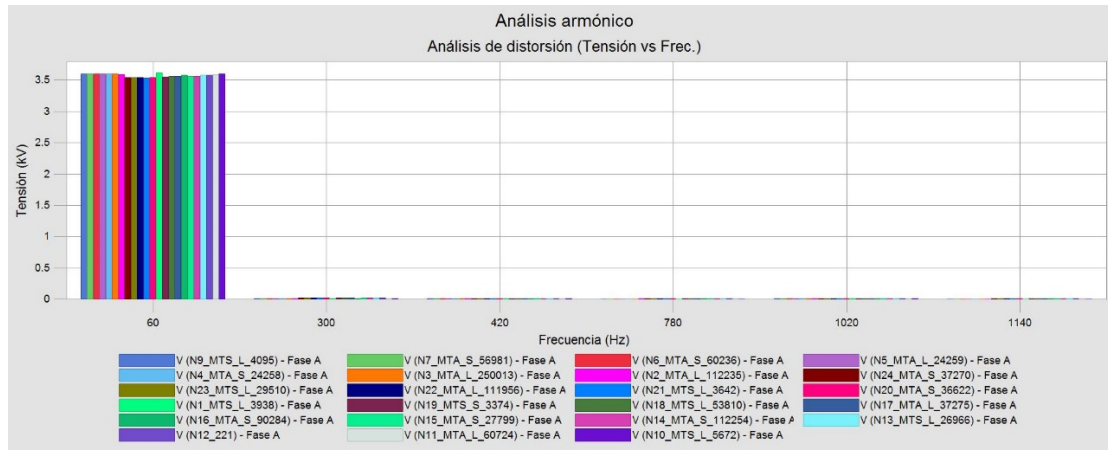


Figura 3.35 Análisis de Armónicos de Tensión Con Estaciones de Carga Fase A

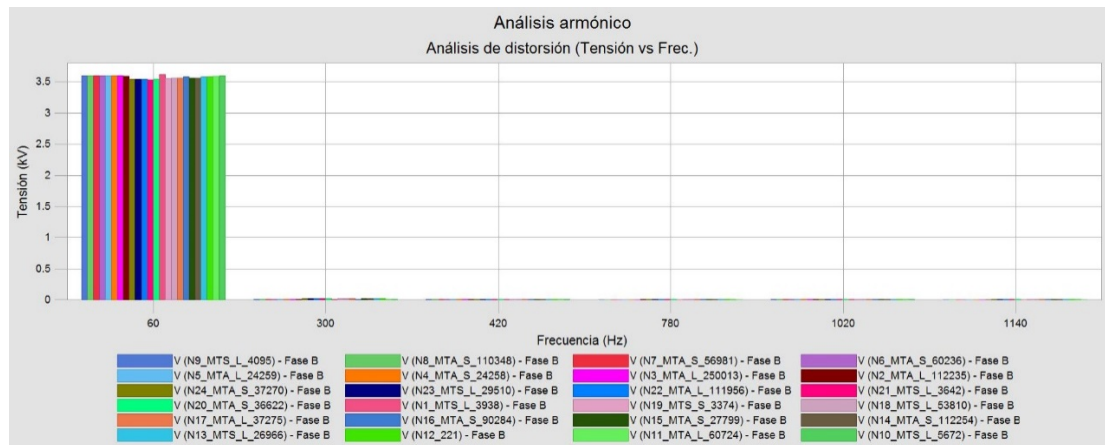


Figura 3.36 Análisis de Armónicos de Tensión Con Estaciones de Carga Fase B

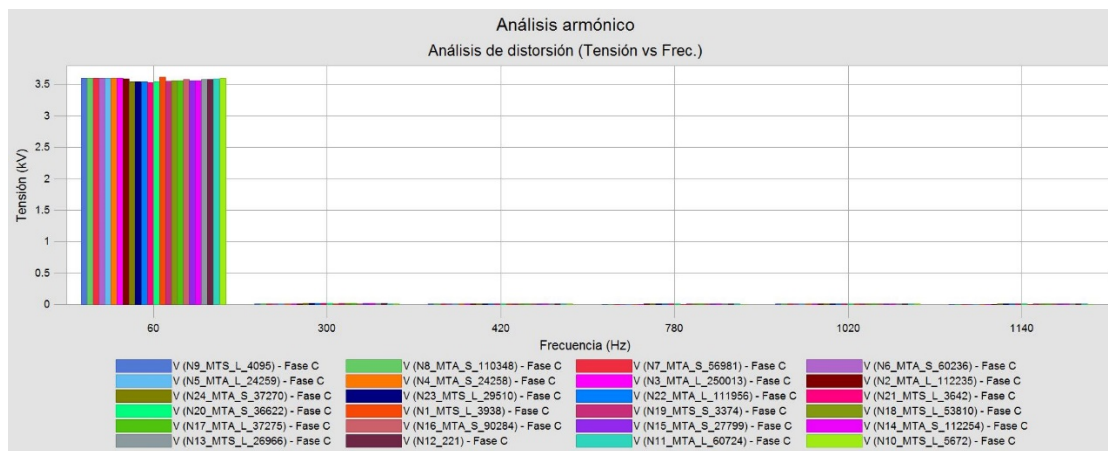


Figura 3.37 Análisis de Armónicos de Tensión Con Estaciones de Carga Fase C



A continuación, se hace un análisis más detallado de los cambios en los armónicos de tensión en los diferentes nodos del alimentador.

En la Tabla 25 se muestra tanto la distorsión armónica (THD) de tensión en cada nodo así como sus respectivos armónicos en las condiciones actuales del alimentador mientras que la Tabla 26 muestra dichos datos para el caso en el que se conectan las estaciones de carga rápida a la red.

A fin de contrastar los cambios en los armónicos de tensión de los nodos generados por las estaciones de carga, en la Tabla 27 se muestra una disminución de hasta 0.01% en los armónicos 5 y 17 del nodo N11 que corresponde al lugar donde se encuentran las estaciones de carga. En los demás nodos existen variaciones de hasta 0.01% en los armónicos 5,13 y 17. La variación en la distorsión armónica causada por las estaciones de carga son casi despreciables pues tampoco superan el 0.01%.

Armónicos de Voltaje Sin Estaciones de Carga						
Nodo	300.00 Hz (%)	420.00 Hz (%)	780.00 Hz (%)	1020.00 Hz (%)	1140.00 Hz (%)	THD (%)
N01	0.29	0.2	0.1	0.24	0.1	0.45
N02	0.37	0.26	0.15	0.35	0.14	0.61
N03	0.32	0.22	0.1	0.23	0.1	0.47
N04	0.32	0.22	0.11	0.24	0.1	0.48
N05	0.32	0.22	0.11	0.24	0.1	0.48
N06	0.32	0.22	0.11	0.25	0.1	0.49
N07	0.32	0.22	0.1	0.23	0.09	0.47
N08	0.32	0.22	0.1	0.23	0.09	0.47
N09	0.32	0.22	0.1	0.23	0.09	0.47
N10	0.36	0.25	0.12	0.3	0.13	0.56
N11	0.38	0.27	0.16	0.37	0.14	0.63
N12	0.41	0.28	0.14	0.34	0.15	0.64
N13	0.41	0.29	0.14	0.35	0.15	0.65
N14	0.44	0.31	0.15	0.36	0.16	0.68
N15	0.44	0.31	0.15	0.36	0.16	0.68
N16	0.39	0.28	0.17	0.38	0.14	0.65
N17	0.45	0.32	0.16	0.39	0.18	0.72
N18	0.45	0.32	0.16	0.39	0.18	0.72
N19	0.47	0.33	0.16	0.36	0.16	0.72
N20	0.48	0.34	0.17	0.37	0.16	0.74
N21	0.52	0.37	0.19	0.39	0.16	0.79
N22	0.49	0.34	0.17	0.37	0.16	0.74
N23	0.49	0.34	0.17	0.37	0.16	0.74
N24	0.49	0.34	0.17	0.37	0.16	0.74

Tabla 25, Armónicos de Voltaje Sin Estación de Carga Rápida





Armónicos de Voltaje Con Estaciones de Carga						
Nodo	300.00 Hz (%)	420.00 Hz (%)	780.00 Hz (%)	1020.00 Hz (%)	1140.00 Hz (%)	THD (%)
N01	0.29	0.2	0.1	0.24	0.1	0.45
N02	0.37	0.26	0.15	0.35	0.13	0.6
N03	0.32	0.22	0.1	0.23	0.09	0.47
N04	0.32	0.22	0.1	0.24	0.1	0.48
N05	0.32	0.22	0.1	0.24	0.1	0.48
N06	0.32	0.22	0.11	0.25	0.1	0.49
N07	0.32	0.22	0.1	0.22	0.09	0.47
N08	0.32	0.22	0.1	0.22	0.09	0.47
N09	0.32	0.22	0.1	0.22	0.09	0.47
N10	0.36	0.25	0.12	0.29	0.12	0.55
N11	0.37	0.27	0.16	0.36	0.14	0.62
N12	0.41	0.28	0.14	0.34	0.15	0.63
N13	0.41	0.29	0.14	0.34	0.15	0.64
N14	0.44	0.31	0.15	0.35	0.16	0.68
N15	0.44	0.31	0.15	0.35	0.16	0.68
N16	0.39	0.28	0.17	0.37	0.14	0.65
N17	0.45	0.32	0.16	0.39	0.18	0.71
N18	0.45	0.32	0.16	0.38	0.17	0.71
N19	0.47	0.33	0.16	0.36	0.15	0.71
N20	0.48	0.34	0.17	0.36	0.16	0.73
N21	0.52	0.37	0.19	0.38	0.16	0.79
N22	0.49	0.34	0.17	0.36	0.16	0.73
N23	0.49	0.34	0.17	0.37	0.16	0.73
N24	0.49	0.34	0.17	0.36	0.16	0.73

Tabla 26, Armónicos de Voltaje Con Estación de Carga Rápida

Cambios en los Armónicos						
Nodo	300.00 Hz (%)	420.00 Hz (%)	780.00 Hz (%)	1020.00 Hz (%)	1140.00 Hz (%)	THD (%)
N01	0	0	0	0	0	0
N02	0	0	0	0	-0.01	-0.01
N03	0	0	0	0	-0.01	0
N04	0	0	-0.01	0	0	0
N05	0	0	-0.01	0	0	0
N06	0	0	0	0	0	0
N07	0	0	0	-0.01	0	0
N08	0	0	0	-0.01	0	0
N09	0	0	0	-0.01	0	0
N10	0	0	0	-0.01	-0.01	-0.01
N11	-0.01	0	0	-0.01	0	-0.01
N12	0	0	0	0	0	-0.01
N13	0	0	0	-0.01	0	-0.01
N14	0	0	0	-0.01	0	0
N15	0	0	0	-0.01	0	0
N16	0	0	0	-0.01	0	0
N17	0	0	0	0	0	-0.01
N18	0	0	0	-0.01	-0.01	-0.01
N19	0	0	0	0	-0.01	-0.01
N20	0	0	0	-0.01	0	-0.01
N21	0	0	0	-0.01	0	0
N22	0	0	0	-0.01	0	-0.01
N23	0	0	0	0	0	-0.01
N24	0	0	0	-0.01	0	-0.01

Tabla 27, Cambios en los Armónicos de Voltaje por las Estaciones de Carga Rápida

### 3.6.2 Impacto de Armónicos en la Corriente de las Líneas del Alimentador.

Las corrientes generadas por la operación de los elementos de conmutación de estado sólido de las estaciones de carga se ven reflejadas en los armónicos de corriente que son inyectados a la red de distribución. Por esta razón en la Tabla 28 se muestra el estado actual de las corrientes y distorsión armónica de las líneas de interés mostradas en la sección 3.5.3 antes de la implementación de estaciones de carga rápida, mientras que en la Tabla 29 se muestran los mismos datos cuando se conectan a las estaciones de carga en la red de distribución.



El análisis comparativo de la red con y sin estaciones de carga se puede observar en la Tabla 30, donde se percibe claramente un aumento en el flujo de corriente en las líneas N1\_N y N1\_E correspondientes a la cabecera del alimentador. En la línea N11\_O que alimenta a las estaciones de carga, también se nota un aumento de la corriente.

En cuanto a los armónicos, estos varían en las líneas cercanas a la carga, sin embargo, esta variación no excede el 0.7% de la corriente fundamental de línea. En cuanto a la variación de la distorsión armónica de la onda de corriente no tiene variaciones aumento de más del 0.01%

Armónicos de Corriente Sin Estaciones de Carga							
Línea	Corriente fund. (A)	300 Hz IHD (%)	420 Hz IHD (%)	780 Hz IHD (%)	1020 Hz IHD (%)	1140 Hz IHD (%)	THD (%)
N1_N	702.81	0.75	0.37	0.1	0.19	0.07	0.87
N1_S	125.94	0.76	0.38	0.07	0.05	0.02	0.86
N1_E	576.99	0.75	0.38	0.12	0.24	0.09	0.89
N2_N	110.53	0.79	0.4	0.1	0.14	0.05	0.9
N2_S	110.53	0.79	0.4	0.1	0.14	0.05	0.9
N2_E	0.04	0.3	0.18	0.08	0.26	0.03	0.44
N3_N	69.24	0.81	0.42	0.11	0.08	0.01	0.92
N3_S	31.11	1.1	0.7	0.38	0.6	0.16	1.49
N3_E	37.55	0.97	0.58	0.29	0.49	0.15	1.27
N7_S	0	3.79	3.26	1.22	0.53	0.29	5.17
N7_E	0.94	0.29	0.2	0.09	0.2	0.09	0.43
N7_O	35.71	1.01	0.6	0.3	0.51	0.16	1.33
N10_S	8.26	1.9	1.38	1.06	2.11	0.68	3.4
N11_S	47.73	0.98	0.6	0.31	0.51	0.14	1.3
N11_E	24.72	0.85	0.54	0.29	0.44	0.11	1.14
N11_O	78.93	0.99	0.62	0.32	0.5	0.14	1.32
N12_NO	369.45	0.78	0.42	0.14	0.24	0.1	0.94
N12_SO	0.01	0.03	0	0	0	0	0.03

Tabla 28, Armónicos de Corriente Sin Estación de Carga Rápida



Armónicos de Corriente Con Estaciones de Carga							
Línea	Corriente fund. (A)	300 Hz IHD (%)	420 Hz IHD (%)	780 Hz IHD (%)	1020 Hz IHD (%)	1140 Hz IHD (%)	THD (%)
N1_N	721.83	0.73	0.36	0.1	0.18	0.06	0.84
N1_S	125.97	0.76	0.38	0.07	0.05	0.02	0.85
N1_E	596.01	0.73	0.37	0.11	0.22	0.08	0.86
N2_N	110.56	0.79	0.39	0.1	0.14	0.05	0.9
N2_S	110.56	0.79	0.39	0.1	0.14	0.05	0.9
N2_E	0.04	0.3	0.18	0.08	0.25	0.03	0.43
N3_N	69.25	0.8	0.42	0.11	0.08	0.01	0.92
N3_S	31.12	1.09	0.7	0.38	0.6	0.16	1.49
N3_E	37.56	0.97	0.58	0.29	0.49	0.15	1.27
N7_S	0	3.67	3.03	1.2	0.56	0.27	4.95
N7_E	0.94	0.29	0.2	0.09	0.2	0.08	0.42
N7_O	35.72	1.01	0.6	0.3	0.51	0.16	1.32
N10_S	8.26	1.9	1.38	1.06	2.11	0.68	3.4
N11_S	47.79	0.98	0.6	0.31	0.51	0.14	1.3
N11_E	24.74	0.85	0.54	0.3	0.44	0.11	1.14
N11_O	97.86	0.78	0.48	0.25	0.39	0.11	1.03
N12_NO	369.53	0.78	0.42	0.14	0.23	0.1	0.93
N12_SO	0.01	0.04	0.01	0	0	0	0.04

Tabla 29, Armónicos de Corriente Con Estación de Carga Rápida

Cambios en los Armónicos de Corriente							
Línea	Corriente fund. (A)	300.00 Hz (%)	420.00 Hz (%)	780.00 Hz (%)	1020.00 Hz (%)	1140.00 Hz (%)	THD (%)
N1_N	19.02	-0.001716	-0.001809	0.01902	-0.036045	-0.058869	-0.03
N1_S	0.03	0.000228	0.000114	2.1E-05	1.5E-05	6E-06	-0.01
N1_E	19.02	0.023448	0.012675	-0.036777	-0.073554	-0.042483	-0.03
N2_N	0.03	0.000237	-0.010936	3E-05	4.2E-05	1.5E-05	0
N2_S	0.03	0.000237	-0.010936	3E-05	4.2E-05	1.5E-05	0
N2_E	0	0	0	0	-0.000004	0	-0.01
N3_N	0.01	-0.006844	4.2E-05	1.1E-05	8E-06	1E-06	0
N3_S	0.01	-0.003002	7E-05	3.8E-05	6E-05	1.6E-05	0
N3_E	0.01	9.7E-05	5.8E-05	2.9E-05	4.9E-05	1.5E-05	0
N7_S	0	0	0	0	0	0	-0.22
N7_E	0	0	0	0	0	-9.4E-05	-0.01
N7_O	0.01	0.000101	6E-05	3E-05	5.1E-05	1.6E-05	-0.01
N10_S	0	0	0	0	0	0	0
N11_S	0.06	0.000588	0.00036	0.000186	0.000306	8.4E-05	0
N11_E	0.02	0.00017	0.000108	0.002532	8.8E-05	2.2E-05	0
N11_O	18.93	-0.018099	-0.019638	-0.007926	-0.012996	-0.002856	-0.29
N12_NO	0.08	0.000624	0.000336	0.000112	-0.036761	8E-05	-0.01
N12_SO	0	0.000001	0.000001	0	0	0	0.01

Tabla 30, Cambios en los Armónicos de Corriente Con Estación de Carga Rápida



### 3.7 Conclusiones del Impacto de las Estaciones de Carga Rápida en la Red de Distribución de Energía Eléctrica.

Con el fin estimar el posible impacto que tendrían las estaciones de carga rápida para vehículos eléctricos en un sistema de distribución, en este capítulo se decidió analizar el alimentador #0204 perteneciente a la zona centro-comercial de la ciudad de Cuenca debido al análisis de locación presentado en la sección 3.3, siendo éste uno de los lugares más idóneos para implementar estaciones de carga rápida.

Con el modelo de estación de carga rápida presentada en la sección 3.2, se puede observar que el impacto de la inclusión de cuatro estaciones de carga en la red de distribución es muy bajo. Esto debido a que en comparación con la capacidad del alimentador y el resto de cargas instaladas la potencia que consumen las estaciones de carga rápida es muy baja.

En el análisis de las caídas de tensión en los nodos mostrados, se puede observar que la caída de tensión no presenta una diferencia mayor al 0.11%. En lo que se refiere a los flujos de potencia a través de las líneas del alimentador, estos presentan aumentos de hasta 6.3% sobre la capacidad de carga de la línea de cabecera, 7.8% en la línea que alimenta a las estaciones de carga rápida y menos del 1% en las demás líneas del alimentador.

El análisis de armónicos de tensión presenta que el impacto de las estaciones de carga rápida genera aumento de hasta un 0.1% de los armónicos de tensión. Es importante mencionar que luego de implementar las estaciones de carga rápida, en los diferentes nodos del alimentador no presentan armónicos mayores al 0.5% de la tensión nominal ni distorsión armónica total (THD) mayor al 0.8%, llegando a estar muy por debajo de los valores máximos establecidos en la norma IEEE 519-2014 para armónicos de voltaje.

El análisis de armónicos de corriente en líneas clave del alimentador muestra que estos varían en las líneas cercanas a la carga, sin embargo, esta variación no excede el 0.7% de la corriente fundamental de línea. En cuanto a la variación de la distorsión armónica total de la onda de corriente no tiene variaciones aumento de más del 0.01%. Luego de implementar las estaciones de carga rápida, se tiene que los armónicos de corriente no exceden una distorsión de 3.67% en una línea, mientras que las demás líneas es inferior al 1.9%. La máxima THD en la corriente es de 4.95% en una línea, mientras que las demás no supera el 1.49% cumpliendo con la norma IEEE 519-2014 para armónicos de corriente.

Tras todo este análisis, se puede concluir que el impacto de las estaciones de carga rápida para vehículos eléctricos es muy bajo en una red de distribución eléctrica de Cuenca, esto debido al sobredimensionamiento existente de la red y al reducido número de estaciones de carga consideradas.



# CAPITULO 4

## Análisis de resultados, observaciones y conclusiones

### 4.1 Análisis de los tipos de Cargadores de Vehículos Eléctricos

En relación a la clasificación de la infraestructura para la carga de los vehículos eléctricos, es importante destacar que existen diferentes tipos de cargadores para los vehículos eléctricos. De este análisis se puede concluir que la mejor categorización de cargadores es la presentada en la norma SAEJ1772, analizada en la sección 1.4.1.

### 4.2 Modelamiento de Estaciones de Carga Rápida.

El modelamiento de estaciones de carga rápida realizado en el capítulo 2, presenta las simulaciones mediante herramientas computacionales correspondientes en *PSim*<sup>®</sup>, se han estudiado cuatro posibles topologías de estaciones de carga para realizar futuros estudios en aspectos como control, tipo de elementos, análisis de armónicos, etc.

De las cuatro topologías analizadas, se observó que el sistema de rectificación trifásica de tipo VIENNA genera una distorsión armónica muy elevada, esto debido a su control por histéresis. Por otro lado, el sistema de rectificador trifásica de tipo VSI permite manejar un amplio rango de flujos de carga manteniendo un nivel constante de voltaje continuo en su salida, así como permite también corregir el factor de potencia en la entrada AC del rectificador.

En cuanto a los convertidores DC/DC aislados, se pudo observar que el convertidor DC/DC de medio puente requiere una mayor relación de transformación, lo que repercute directamente en el estrés eléctrico que deben soportar sus componentes. En el caso del convertidor DC/DC de puente completo, este presenta una mayor estabilidad al realizar las etapas de carga de batería tanto por corriente constante como por voltaje constante.

Tras analizar los diferentes rectificadores y convertidores DC/DC, se llegó a la conclusión de que la mejor topología de entre las estudiadas en este documento para representar una estación de carga rápida es la que se conforma de un rectificador de tipo VSI con un convertidor DC/DC aislado de puente completo.



#### 4.3 Modelamiento de Batería de Polímero de Litio.

En la sección 2.5 del capítulo 2, se muestra un modelamiento de una batería para vehículos eléctricos. Del análisis realizado en esta sección se sabe que la tecnología recomendada para implementar en una simulación es el de una batería de Li-Po de 30kWh con un voltaje nominal de 360V, estos parámetros se sustentan en [30] que presenta las características generales la batería de un auto eléctrico.

Para el modelar la batería se utiliza el modelo presentado en [33], que fue escalado hasta obtener el modelo correspondiente al banco de batería de un auto eléctrico, permitiendo obtener su modelo simplificado presentado en la sección 2.5.3.

El modelo planteado en la sección 2.5 permite simular una batería de polímero de litio que permite carga y descarga de energía, tiene un voltaje variable en función del estado de carga con una curva de carga muy parecida a la de un banco de baterías real.

La principal utilidad de este modelo de batería, es que permite probar el funcionamiento de la estación de carga modelada durante una carga completa de la batería, llegándose a un mejor conocimiento de las características dinámicas de las estaciones de carga, así como la comprobación de los sistemas de control de carga implementados en las estaciones de carga rápida.

#### 4.4 Parámetros estudiados para la ubicación de estaciones de carga rápida.

Los parámetros utilizados para elegir el lugar idóneo se indican en [37] y se analizan en la sección 3.3.1, donde se plantea que los mejores lugares para la implementación de estaciones de carga rápida de ev son aquellos que presentan un alto tráfico de vehículos y se encuentran en zonas de entrada o salida de la ciudad así como cercanos áreas de alto tráfico, como por ejemplo a edificios gubernamentales, clínicas, centros comerciales, librerías, restaurantes, etc.

En este estudio se omitió las zonas de salida o entrada a la ciudad, a fin de determinar el lugar más adecuado para implementar estaciones de carga rápida dentro de la ciudad y luego de un análisis se determinó que el lugar con mayor cantidad de centros comerciales, parques, edificios gubernamentales, clínicas y parqueadero es el sector del parque público ubicado en la avenida 12 de Abril y calle Federico Malo llamado "Parque de la Madre" puesto que el parqueadero de este parque presenta una ocupación de promedio de únicamente el 87% de sus plazas y por su característica publica con servicio de seguridad 24 horas para protección de las estaciones de carga.



#### 4.5 Implementación de Estaciones de Carga Rápida en una Alimentador.

El factor determinante en la implementación de una nueva carga en una red de distribución es la capacidad disponible en el alimentador, la afectación en las caídas de voltaje en los distintos nodos del alimentador, el flujo de carga a través de las líneas, el consumo de reactivos, los armónicos de corriente o voltaje presentes en el nodo y la distorsión armónica que la nueva carga genera en el punto de conexión y en el alimentador.

En el caso de las estaciones de carga rápida, se plantea la implementación de un conjunto de cuatro estaciones de 50kVA cada una, conectadas al alimentador mediante un transformador de distribución de 200kVA con configuración triángulo en el lado de media tensión y estrella en el lado de baja tensión. Cada una de las estaciones se modela como una carga resistiva con una fuente de armónicos de corriente como se muestra en la sección 3.2.

Al implementar el modelo de las estaciones de carga junto con su transformador en el alimentador modelado previamente por la empresa eléctrica CENTROSUR de la ciudad de Cuenca, se procedió a realizar el respectivo análisis de caída de voltaje, flujos de carga, capacidad utilizada de las líneas, análisis de armónicos de tensión y corriente.

Del análisis de caídas de voltaje mostrado en la sección 3.5.2 se tiene que la caída de voltaje en los nodos no supera un aumento del 0.11%, lo que no constituye ningún problema para los niveles de tensión la red.

En cuanto al análisis de flujos de potencia, la implementación de las estaciones de carga rápida no supera un aumento mayor al 2.7% en la potencia de la línea de arranque del alimentador en estudio, no presentando ningún problema para la estabilidad y operación del alimentador.

En el análisis de armónicos de la sección 3.6, se observó que las variaciones en los armónicos de corriente y tensión generados por las estaciones de carga rápida no superan el 0.01% con respecto a los valores de los armónicos que existen actualmente en el alimentador en estudio, sin constituir ningún problema en la calidad de energía de la red.

Luego del análisis realizado sobre el impacto que tiene la implementación de cuatro estaciones de carga rápida en el alimentador #0204 de la ciudad de Cuenca, se ha demostrado que su incidencia es mínima en el alimentador, y que, por consecuencia, la implementación de este tipo de estaciones de carga es completamente factible con la infraestructura actual.





#### 4.6 Próximas Líneas de Investigación en esta Área.

Como resultado del modelamiento de estaciones de carga rápida y baterías de autos eléctricos, se recomienda la investigación en mejores sistemas de control de las estaciones de carga rápida, así como el análisis comparativo de diferentes tecnologías de baterías de autos eléctricos tomando en cuenta la degradación de las baterías causadas por el impacto que tiene en ellas la carga con altas corrientes.

En cuanto al análisis del impacto de las estaciones de carga rápida en una red eléctrica, se recomienda realizar nuevos análisis del impacto que tienen las estaciones de carga rápida en lugares ubicados en las salidas y entradas a la ciudad.

A fin de conocer la eficiencia de los autos eléctricos en una ciudad con altitud superior a los 2000 metros sobre el nivel del mar como es el caso de Cuenca, se recomienda realizar estudios en el consumo de energía de autos eléctricos que circulen actualmente en esta ciudad.



# Bibliografía

- [1] A. Khaligh and S. Dusmez, "Comprehensive topological analysis of conductive and inductive charging solutions for plug-in electric vehicles," *IEEE Trans. Veh. Technol.*, vol. 61, no. 8, pp. 3475–3489, 2012.
- [2] Vicepresidencia\_Ecuador, "Estrategia Nacional para el Cambio de la Matriz Productiva," 2013. [Online]. Available: <http://www.vicepresidencia.gob.ec/wp-content/uploads/2013/10/ENCMPweb.pdf>.
- [3] INER, "Proyectos Emblemáticos," 2013. [Online]. Available: <http://www.energia.gob.ec/proyectos-emblematicos-2/>.
- [4] INER, "Eficiencia Energética en el Transporte," 2014. [Online]. Available: [http://www.iner.gob.ec/wp-content/uploads/downloads/2014/12/TRANSPORTE\\_DOSSIER.pdf](http://www.iner.gob.ec/wp-content/uploads/downloads/2014/12/TRANSPORTE_DOSSIER.pdf).
- [5] MIPRO, "Convenio de Cooperación Sector Automotriz," 2016. [Online]. Available: <http://www.produccion.gob.ec/vehiculos-electricos-una-realidad-en-ecuador/>.
- [6] MIPRO, "Cuenca da primeros pasos para la inserción de vehículos eléctricos," 2015. [Online]. Available: <http://www.produccion.gob.ec/cuenca-da-primeros-pasos-para-la-insercion-de-vehiculos-electricos/>.
- [7] Telegrafo, "Loja da primeros pasos para la inserción de vehículos eléctricos," *Artículo*, 2017. [Online]. Available: <http://www.eltelegrafo.com.ec/noticias/regional-sur/1/loja-es-pionera-en-el-transporte-electrico>.
- [8] ChargingBox.SA, "Charging Box," 2016. [Online]. Available: <https://www.charging-box.com/es/>.
- [9] SAE, *SAE Electric Vehicle Conductive Charge Coupler*, no. 1996–10. United States, 2001.
- [10] V. Schwarzer and R. Ghorbani, "Current State-of-the-Art of EV Chargers," Honolulu, Hi, 2015.
- [11] Schnellladen, "Cargador Tipo 2," 2017. [Online]. Available: <http://www.schnellladen.ch/de/typ-2-iccbs>.
- [12] Bossh, "Cargador Tipo 3," 2015. [Online]. Available: <https://www.boschevsolutions.com/>.
- [13] Tesla.Inc, "Supercargador TESLA," 2017. [Online]. Available: [https://www.tesla.com/es\\_ES/supercharger](https://www.tesla.com/es_ES/supercharger).



- [14] S. Habib, M. Kamran, and U. Rashid, "Impact analysis of vehicle-to-grid technology and charging strategies of electric vehicles on distribution networks - A review," *J. Power Sources*, vol. 277, pp. 205–214, 2015.
- [15] M. De Freige, "Design and simulation of a fast-charging station for plug-in hybrid electric vehicle(PHEV) batteries," *Masters Abstr. Int.*, no. February, 2011.
- [16] IEEE, *IEEE Standard Technical Specifications of a DC Quick Charger for Use with Electric Vehicles IEEE Vehicular Technology Society IEEE Standard Technical Specifications of a DC Quick Charger for Use with Electric Vehicles*. 2015.
- [17] M. C. Kisacikoglu, "Vehicle-to-grid ( V2G ) Reactive Power Operation Analysis of the EV / PHEV Bidirectional Battery Charger," p. 40, 2013.
- [18] G. T. Kim and T. A. Lipo, "VSI-PWM rectifier/inverter system with a reduced switch count," *IEEE Trans. Ind. Appl.*, vol. 32, no. 6, pp. 1331–1337, 1996.
- [19] S. Mao, T. Wu, and X. Lu, "Three-phase active front-end rectifier efficiency improvement with silicon carbide power semiconductor devices," 2016.
- [20] N. B. H. Youssef, K. Al-Haddad, and H. Y. Kanaan, "Implementation of a new linear control technique based on experimentally validated small-signal model of three-phase three-level boost-type Vienna Rectifier," *IEEE Trans. Ind. Electron.*, vol. 55, no. 4, pp. 1666–1676, 2008.
- [21] M. Liserre, F. Blaabjerg, and S. Hansen, "Design and Control of an LCL - Filter-Based Three-Phase Active Rectifier," *IEEE Trans. Ind. Appl.*, vol. 41, no. 5, pp. 1281–1291, 2005.
- [22] G. E. M. Ruiz, N. Muñoz, and J. B. Cano, "Modeling , Analysis and Design Procedure of LCL Filter for Grid Connected Converters," pp. 0–5, 2015.
- [23] A. Arancibia and K. Strunz, "Modeling of an electric vehicle charging station for fast DC charging," *2012 IEEE Int. Electr. Veh. Conf.*, no. 3, pp. 1–6, 2012.
- [24] L. G. G. Morales, "Mejora de la eficiencia y de las prestaciones dinámicas en procesadores electrónicos de potencia para pequeños aerogeneradores sincrónicos operando en régimen de velocidad variable," Universitat Politècnica de València Departamento de Ingeniería Electrónica, 2011.
- [25] M. H. Rashid, "Power Electronics Handbook, Second Edition: Devices, Circuits and Applications (Engineering)." San Diego, California, 2006.
- [26] F. M. Gonzalez-Longatt, "Entendiendo la Transformacion de Park," *IEEE Trans. Power Electron.*, p. 4, 2004.
- [27] E. Figueres, G. Garcerá, J. Sandia, F. González-Espín, and J. C. Rubio, "Sensitivity study of the dynamics of three-phase photovoltaic inverters with an LCL grid filter," *IEEE Trans. Ind. Electron.*, vol. 56, no. 3, pp. 706–717, 2008.



2009.

- [28] B. H. Kwon, J. H. Youm, and J. W. Lim, "A line-voltage-sensorless synchronous rectifier," *IEEE Trans. Power Electron.*, vol. 14, no. 5, pp. 966–972, 1999.
- [29] J. W. Kolar, H. Ertl, and F. C. Zach, "Design and experimental investigation of a three-phase high power density high efficiency unity power factor PWM (VIENNA) rectifier employing a novel integrated power semiconductor module," *Appl. Power Electron. Conf. Expo. 1996. APEC '96. Conf. Proc. 1996., Elev. Annu.*, vol. 2, pp. 514–523 vol.2, 1996.
- [30] K. Young, C. Wang, L. Y. Wang, and K. Strunz, *Electric Vehicle Integration into Modern Power Networks*. 2013.
- [31] M. Vergara, "Tecnología de Baterías," pp. 1–2.
- [32] Idaho National Laboratory, "2015 Kia Soul EV Advanced Vehicle Testing – Baseline Vehicle Testing Results," 2015.
- [33] M. Ceylan, T. Sar, and A. Bal, "A Novel Lithium-Ion-Polymer Battery Model for Hybrid / Electric Vehicles," pp. 366–369, 2014.
- [34] L. G. Gonzalez, "Reporte Técnico sobre Consideraciones Eléctricas: Diseño del Sistema de conversión de energía capaz de gestionar la carga rápida de vehículos," Cuenca, Ecuador, 2017.
- [35] Vitroperm\_S.A., "Núcleo VITROPERM 500F," 2003.
- [36] European Commission, "Fast charging diversity impact on total harmonic distortion due to phase cancellation effect experimental results," 2017.
- [37] J. S. Jin, "Installing Public Electric Vehicle Charging Stations: A Site Suitability Analysis in Los Angeles County, California by," no. May, 2016.
- [38] E. Jaramillo, "Evaluación de impacto vial en Av. Fray Vicente Solano, operación vehicular y ciclovía," Universidad Politécnica Salisiana, 2016.